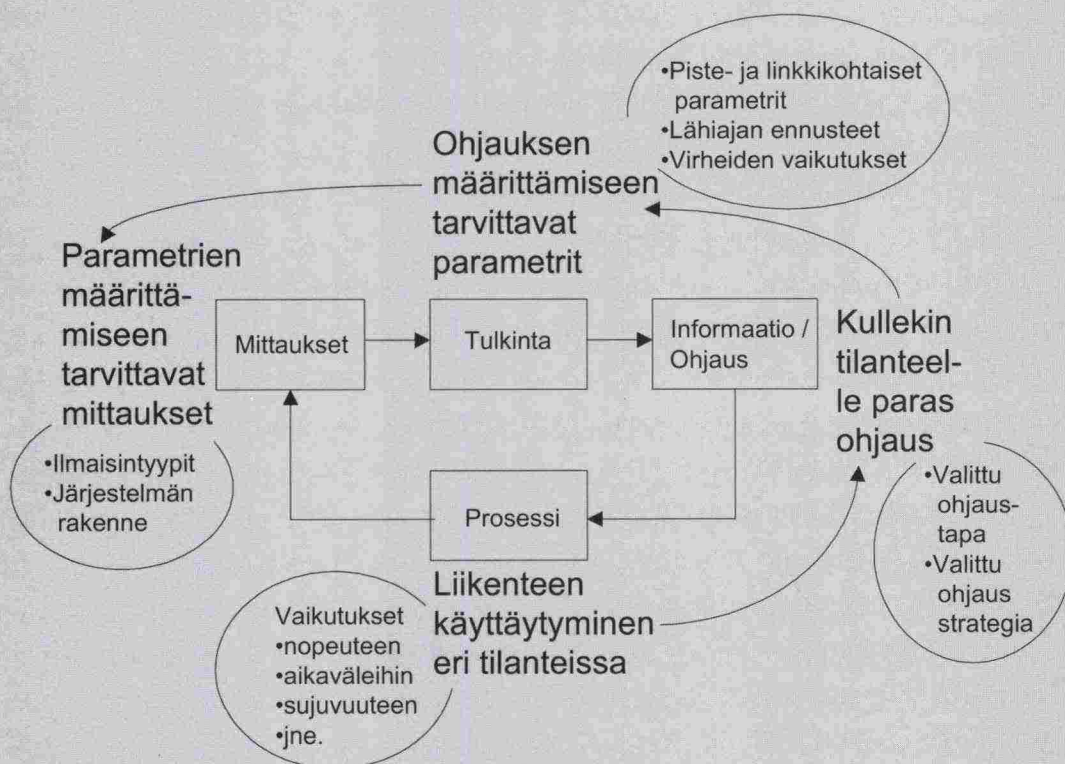


Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät



Tielaitoksen
selvityksiä

28/1999

Helsinki 1999

TIEHALLINTO
Liikenteen palvelut

Tielaitoksen selvityksiä
28/1999

Satu Innamaa

Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät

Tielaitos
TIEHALLINTO

Helsinki 1999

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-557-3
TIEL 3200573

Edita Oy
Helsinki 1999

Julkaisua myy:
Tielaitos, julkaisumyynti
Puhelin 0204 44 2053
Telefax 0204 44 2652
E-mail elsa.juntunen@tieh.fi



Tielaitos
TIEHALLINTO
Liikenteen palvelut
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 44 150

Tielaitos: Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät. Helsinki 1999. Tielaitos, Tielaitoksen selvityksiä 28/1999. 136 s. ISBN 951-726-557-3. ISSN 0788-3722. TIEL 320 0573.

Asiasanat: telematiikka, liikenteen hallinta, liikenteen seuranta, liikenteen ohjaus, liikenteen tiedotus, liikennevirta, muuttuvat opasteet, häiriöiden havaitseminen

Aiheluokka: 11, 20, 22

TIIVISTELMÄ

Selvityksen tavoitteena on luoda katsaus automaattisiin liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmiin, analysoida niiden ongelmia ja ratkaisuvaihtoehtoja sekä muodostaa omia johtopäätöksiä. Selvityksessä käydään läpi automaattisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien tietotarpeita, erilaisia liikenteen mittaamismenetelmiä, tietojen tulkitsemista, esimerkkejä erilaisista järjestelmistä sekä näiden vaikutuksia liikennevirtaan.

Liikenteenohjausjärjestelmät tarvitsevat liikenteestä hyvin tarkkoja ja ajantasaisia tietoja. Liikennetietojärjestelmälle riittävät harvempaan tehty päivitykset, mutta se tarvitsee tietoja laajemmalla alueella. Kiinteistä ilmaisimista vain harva kykenee tuottamaan kaikki tarvittavat tiedot liikenteestä. Ilmaisimien heikkoutena on myös se, että ne mittaavat yleensä poikkileikkauskohtaisia parametrejä, vaikka monet sovellukset tarvitsevat reaaliaikaisia linkkikohtaisia tietoja.

Suuri osa linkkidatan mittaussuunnitelmista perustuu ajoneuvon tunnistamiseen kahdessa tai useammassa pisteessä tutkittavalla tiejaksolla. Ajoneuvojen tunnistaminen tehdään joko tunnistamalla jokainen ajoneuvo yksiselitteisesti tai siten, ettei tallennetta voi yksiselitteisesti yhdistää mihinkään tiettyyn ajoneuvoon. Liikenteen seassa liikkuvat ja automaattisesti eri linkkien matka-ajat raportoivat anturiajoneuvot ovat arvokkaita tietolähteitä. Anturiajoneuvot voivat olla osa monipuolista reittiopastusjärjestelmää tai ne on voitu varustaa myös nimenomaan liikenteen seurantaa varten.

Dynaamiset järjestelmät eivät voi toimia reaktiivisesti, vaan niiden täytyy osata ennakoita liikennetilanteet ja sopeuttaa strategiansa ajoissa. Se, että järjestelmä pystyy jatkuvasti päivittämään ennusteita useita minutteja eteenpäin, on ehdoton dynaamisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien toiminnan edellytys. Automaattinen häiriöiden havaitseminen on myös tärkeä osa liikenteenohjauksista. Tarvittavan häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän luonne on riippuvainen häiriön määritelmästä ja liikenteen määrästä.

Nopeusrajoituksen alentamisen on mm. havaittu laskevan keskinopeutta, vähentävän suurien nopeuden muutoksia ja pienentävän nopeuksien hajontaa. Myös liikennemäärän kasvaessa suuret nopeuden muutokset vähenevät. Liukas ajorata -merkki ja muuttuva turvaväli -opaste laskevat keskinopeutta.

Yksinkertaiset menetelmät linkkikohtaisten parametrien automaattiseen estimointiin ja lähitulevaisuuden liikennetilanteen ennustamiseen, virheilmaisujen ja ilmaisinvikojen vaikutukset parametrien estimointiin ja järjestelmän toimintaan, järjestelmän rakenteen ja toiminnan välinen yhteys sekä järjestelmien vaikutukset liikennevirtaan liikenneolosuhteiden funktiona kaipaavat vielä jatkotutkimusta.

Tielaitos: Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät. [*Automatic Traffic Control and Information Systems*]. Helsinki 1999. Finnish National Road Administration. 136 p. ISBN 951-726-557-3. ISSN 0788-3722. TIEL 320 0573.

Keywords: traffic telematics, traffic management, traffic monitoring, traffic control, traffic information, traffic flow, variable message sign, incident detection

ABSTRACT

The purpose of the study is to take a review of automatic traffic control and information systems, to analyze their problems and different solutions and to make own conclusions. In the study, the information needs of automatic traffic control and information systems, different methods to measure traffic, the interpretation of information, examples of different systems and the effects that they have on traffic flow are gone through.

Traffic control systems need very exact and real-time information. For a traffic information system, it is sufficient to get updating at longer intervals but it needs information from a wider area. Only few of the infrastructure-based detectors can provide all the information needed. Another disadvantage of these detectors is that they usually measure parameters in one point though many applications need real-time link-based information.

Most methods to measure link-data are based on the vehicle recognition in two or more points on the road in question. The recognition is usually done absolutely or relatively, when the observation cannot be connected to any particular vehicle. Probe vehicles that move along the traffic flow and report link travel times automatically are valuable sources of information. Probe vehicles can be part of a versatile route guidance system or they can be equipped solely for performing a monitoring task.

Dynamic systems can not function reactively but they have to be able to anticipate traffic situations and to adjust their strategy in time. It is an essential necessity for the functioning of a dynamic traffic control and information system that the system is able to update forecasts continuously several minutes ahead. Also automatic incident detection is an important part of traffic control. The characteristics of the incident detection system needed depend on the definition of the incident and on the traffic volume.

The lowering of speed limit has been seen to reduce the mean speed, to lessen large changes in speed, and to decrease the deviation of speed. Large changes in speed lessen also as the traffic volume increases. The sign warning about slippery road conditions and the variable safety margin sign reduce the mean speed.

Simple methods for the automated estimation of link-based parameters and prediction of near-future traffic conditions, the effects that errors in detection and faults in detectors have on the estimation of parameters and on the functioning of the system, the connection between the structure and the functioning of a system, and the effects that systems have on traffic flow as a function of traffic conditions still need to be studied further.

ALKUSANAT

Tielaitos ja Liikenneministeriö ovat tilanneet tutkimuksen automaattisista liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmistä osana Liikenneministeriön TETRA - Liikenteen telematiikan rakenteiden tutkimus- ja kehittämisohjelmaa 1998 - 2000. Tämä kirjallisuusselvitys on valmistunut osana ko. toimeksiantoa.

Selvitys on tehty Madridin teknillisessä korkeakoulussa (Universidad Politécnica de Madrid) Espanjassa. Kirjallisuusselvityksen tekemisestä vastasi diplomi-insinööri Satu Innamaa Teknillisestä korkeakoulusta ja ohjaajana toimi professori Matti Pursula Teknillisestä korkeakoulusta. Tutkimuksen etenemistä valvoi projektiryhmä, johon kuuluivat tekniikan tohtori Jussi Sauna-aho Liikenneministeriöstä, diplomi-insinööri Kari Hiltunen Tielaitoksen tiestötiedot-yksiköstä, diplomi-insinöörit Mirja Noukka ja Sami Luoma Tielaitoksen liikenteen palvelut -yksiköstä, diplomi-insinööri Pekka Rajala Uudenmaan tiepiiristä sekä tekniikan tohtori Risto Kulmala VTT:ltä.

Lämmin kiitos Merja Penttiselle, Anna Schirokoffille, Mirja Noukalle, Åsa Enbergille ja Manuel G. Romana Garcíalle avusta kirjallisuuslähteiden etsinnässä.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	13
2	AUTOMAATTISEN LIIKENTEENOHJAUKSEN JA LIIKENNETIETOJÄRJESTELMIEN TIETOTARPEET	15
2.1	Automaattisen liikenteenohjauksen tietotarpeet	15
2.2	Liikennetietojärjestelmien tietotarpeet	17
3	LIIKENTEEN MITTAUSMENETELMÄT	19
3.1	Kiinteät ilmaisimet	19
3.1.1	Pneumaattinen letkuilmaisim	19
3.1.2	Koaksiaali-ilmaisim	19
3.1.3	Infrapunailmaisim	19
3.1.4	Tutkailmaisim	20
3.1.5	Ultraääni-ilmaisim	20
3.1.6	Akustinen ilmaisim	21
3.1.7	Induktioilmaisim	21
3.1.8	Magnetometri	22
3.1.9	Videoilmaisim	22
3.1.10	Ajoneuvojen tunnistamisesta yleisesti	23
3.1.11	Kiinteiden ilmaisimien välinen vertailu ja arviointi	24
3.2	Anturiajoneuvot	27
3.2.1	Anturiajoneuvojärjestelmät ja anturiajoneuvot	27
3.2.2	Anturiajoneuvon sijainnin määrittäminen	28
3.2.3	Kysyntä- ja tarjontalähtöiset anturiajoneuvojärjestelmät sekä penetraatioasteen vaikutus järjestelmien toimintaan	30
3.2.4	Tarvittava anturiajoneuvojen määrä	31
4	TIETOJEN TULKITSEMINEN	33
4.1	Linkkidata	33
4.1.1	Taustaa	33
4.1.2	Pistedatan ja linkkidatan välinen vertailu	34
4.1.3	Linkkiparametrien estimointi anturiajoneuvojen avulla	37
4.1.4	Matka-ajan määrittäminen induktioilmaisimien avulla	40
4.2	Häiriöiden havaitseminen	43
4.2.1	Yleistä	43
4.2.2	Perinteiset menetelmät	44
4.2.3	Uudet menetelmät	46
4.3	Liikennetilanteen ennakkointimenetelmät	48

4.3.1	Menetelmien välisiä vertailuja	48
4.3.2	Sijoittelu ja simulointi	53
4.3.3	Kalman-suodatus	55
4.3.4	Neuroverkot ja sumea päättely	58
4.3.5	Muita neuroverkkomalleja	60
5	AUTOMAATTISIA LIIKENTEENOHJAUS- JA LIIKENNETIETOJÄRJESTELMIÄ	63
5.1	Muuttuvat opasteet	63
5.2	Sääohjauksinen tie (vt 7)	63
5.3	Länsiväylä	66
5.4	Liikennetietojärjestelmä E18:lla Norjassa	66
5.5	Muita eurooppalaisia järjestelmiä	69
5.5.1	Amsterdamin kehätie	69
5.5.2	Saksalainen liikenteenohjausstrategia	69
5.5.3	Perugian moottoritie Italiassa	73
5.6	Yhdysvallat	76
5.6.1	Washington	76
5.6.2	Houston	77
5.7	Japani	78
5.7.1	Yleistä	78
5.7.2	Tokio	79
5.7.3	Yokohama	82
5.7.4	Tomein moottoritie	84
5.7.5	Metropolitan-moottoritie	85
5.8	Taiwanin moottoritieverkko	86
6	LIIKENTEENOHJAUksen JA LIIKENNEINFORMAATION VAIKUTUKSET LIIKENNEVIRTAAN	88
6.1	Muuttuvat nopeusrajoitukset	88
6.1.1	Valtatie 1	88
6.1.2	Valtatie 5	89
6.1.3	Sääohjauksinen tie (vt 7)	89
6.1.4	Valtatie 9	91
6.1.5	Länsiväylä	91
6.1.6	Kansainvälisen kirjallisuusselvityksen tuloksia	92
6.1.7	Hollantilaisia tuloksia	94
6.2	Muuttuvat kelivaroitusmerkit	100
6.3	Muuttuvat turvaväliopasteet	101

6.4	Ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet	101
6.4.1	Valtatie 4	101
6.4.2	HOPES-projektin tuloksia	102
6.4.3	Hollannissa tehty ajosimulaattoriin perustuva tutkimus	103
6.4.4	Muita hollantilaisia tuloksia	106
6.4.5	Pariisin SIRIUS-järjestelmän avulla tehty kenttätutkimus	107
6.4.6	SP-tutkimus kuljettajien reaktioista muuttuviin opasteisiin	111
6.4.7	Simulaattoritutkimus muuttuvien opasteiden vaikutuksesta reitinvalintaan	113
7	YHTEENVETO	115

7.1	Tutkimuksen tarkoitus	115
7.2	Automaattisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien liikennetietotarpeet	115
7.3	Liikenteen mittaamismenetelmät	115
7.3.1	Kiinteät ilmaisimet	115
7.3.2	Anturijoneuvot	117
7.4	Tietojen tulkitseminen	117
7.4.1	Linkkidata	117
7.4.2	Häiriöiden havaitseminen	118
7.4.3	Liikennetilanteen ennustaminen	118
7.5	Automaattisia liikenteenohjaus- ja liikennetietojärjestelmiä	120
7.6	Liikenteenohjauksen ja liikenneinformaation vaikutukset liikennevirtaan	122
7.6.1	Muuttuvat nopeusrajoitukset	122
7.6.2	Muuttuvat kelivaroitusmerkit	123
7.6.3	Muuttuvat turvaväliopasteet	124
7.6.4	Ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet	124
8	PÄÄTELMIÄ	126

8.1	Linkkikohtaisten parametrien estimointi	126
8.2	Liikenne-ennusteiden tekeminen	127
8.3	Virheiden havaitseminen ja niiden vaikutukset	128
8.4	Järjestelmän rakenteen ja toiminnan välinen yhteys	128
8.5	Järjestelmien vaikutukset liikennevirtaan	129
	LÄHDELUETTELO	130

1 JOHDANTO

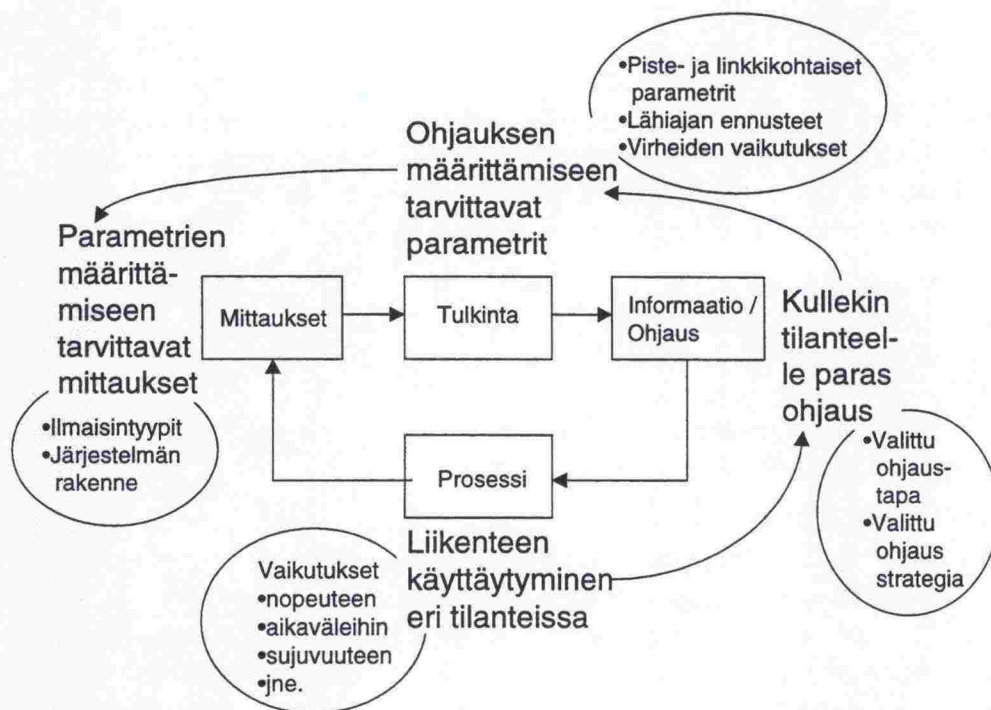
Tutkimuksen tarkoituksena on analysoida moottoriväylien ja sekaliikenneteiden automaattisia liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmiä, niiden tietotarpeita, vaikutuksia ja uusia sovelluksia. Tavoitteena on selvittää, kuinka saada kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopiva järjestelmä.

Tutkimuksen aihe on hyvin ajankohtainen. Jatkuvasti kasvavat liikennemäärät aiheuttavat yhä enenevässä määrin ruuhkaa sekä kasvavan liikenneturvallisuus- ja ympäristöongelman. Liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät ovat eräs ratkaisu näihin ongelmiin. Tielaitos onkin rakentamassa erilaisia automaattisia järjestelmiä Suomen pääteille. Myös Suomen omaleimaisten sää- ja keliolosuhteiden takia tarvitaan paikallista tutkimusta.

Liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät koostuvat kolmesta pääosasta: 1) mittausosasta, joka tekee havaintoja liikenteestä, 2) tulkintaosasta, joka nimensä mukaisesti tulkitsee mittausosasta tulevat signaalit nopeus-, aikaväli- ym. havainnoiksi, sekä 3) informaatio- tai ohjausosasta, joka määrittelee vallitsevan liikennetilanteen, ennustaa tulevaa liikennettä ja erilaisten ohjaus- tai informaatiovaihtoehtojen vaikutusta sekä valitsee kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopivan ohjaus- tai informaatiovaihtoehdon.

Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää näiden kolmen osan välisiä riippuvaisuuksia, jotta halutulle liikenteenohjaus- tai liikenneinformaatiojärjestelmälle saadaan valittua mahdollisimman hyvä tulkinta- ja mittausjärjestelmä. Näin järjestelmistä saadaan mahdollisimman suuri hyöty.

Kuvassa 1 on esitetty yhteenvetona liikenteenohjausprosessi ja sen komponentit. Perusprosessina on mittauksen, tulkinnan, informaation/ohjauksen ja liikenneprosessin muodostama silmukka. Kullekin tilanteelle sopiva ohjaus pitäisi määrittää sen perusteella, kuinka liikenne käyttäytyy eri olosuhteissa ja erilaisilla ohjauksilla. Ohjausstrategia määrittelee, mitä liikennevirtaparametrejä halutaan määritellä, ja mittaukset tai ilmaisintyytit ja -sijainnit pitäisi määritellä näiden parametrien perusteella.



Kuva 1. Liikenteenohjausprosessi ja sen komponentit.

Nyt tehdyn kirjallisuusselvityksen tavoitteena on tehdä katsaus aihepiiriin, analysoida tutkimuskokonaisuuden keskeisten osa-alueiden ongelmia ja ratkaisuvaihtoehtoja sekä muodostaa omia johtopäätöksiä.

Selvityksen luvussa 2 käydään läpi automaattisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien tietotarpeita. Luvussa 3 esitellään erilaisia liikenteen mittausmenetelmiä, jotka on jaettu kiinteisiin ilmaisimiin ja ei-infrastruktuuriin perustuviin ilmaisimiin eli anturijoneuvoihin. Luku 4 käsittelee tietojen tulkitsemista, eli kuinka ilmaisimien avulla saatu tieto saadaan muutettua linkkidataksi, kuinka liikenteen häiriötä havaitaan ja miten liikennetilannetta ennakoidaan. (Liikenteen seurannasta ja häiriöiden havainnoinnista löytyy lisää tietoa viitteestä Johansson (1996).) Luvussa 5 esitellään erilaisia automaattisia liikenteenohjaus- ja liikennetietojärjestelmiä. Luvussa 6 taas käsitellään liikenteenohjauksen ja liikenneinformaation vaikutuksia liikennevirtaan. Muuttuvat nopeusrajoitukset, keli-varoitukset ja turvaväliopasteet sekä ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet on käsitelty eri kappaleissa. Lopuksi luvussa 7 esitetään yhteenveto ja luvussa 8 päätelmiä.

2 Automaattisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien tietotarpeet

2.1 Automaattisen liikenteenohjauksen tietotarpeet

Liikenteenohjausjärjestelmät keskittyvät johonkin tiettyyn tieverkon osaan ja pyrkivät optimoimaan liikenteen sujuvuutta paikallisella tai alueellisella tasolla. Liikenteenohjausjärjestelmät tarvitsevat hyvin tarkkoja ja ajantasaisia tietoja liikenteestä (Westerman 1995). *Taulukossa 1* on esitetty erilaisten automaattisten liikenteenohjausjärjestelmien tietotarpeita. On huomattava, että eri järjestelmien vaatima tietojen päivitystiheys ja tiedonhankinta-alueen maantieteellinen laajuus vaihtelevat runsaasti (Kulmala & Luoma 1998).

Taulukko 1. Erilaisten automaattisten liikenteenohjausjärjestelmien tietotarpeet (Kulmala & Luoma 1998).

Ohjausjärjestelmä	Tietotarpeet
Liikennetilanteeseen perustuva tiejaksokoh- tainen liikenteenohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Keliin ja säähän perustuva tiejaksokohtainen liikenteenohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Lämpötila: ilma, tie, maaperä, kastepiste • Sademäärä • Lumen / veden esiintyminen tienpinnalla • Mustan jään esiintyminen tienpinnalla • Tienpinnan kitka • Näkyvyys • Tuuli: nopeus, suunta, puuskaisuus
Liikenneverkon liikenteenohjaus	<p>Pääosilta verkkoa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Linkkikohtaiset matka-ajat • Jononpituus • Valvontakameran kuva
Kaistaohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Valvontakameran kuva (kiinteiden kohteiden kuten ajoneuvojen maantieteellinen asema) • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Tunneliohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Jononpituus • Valvontakameran kuva (kiinteiden kohteiden kuten ajoneuvojen maantieteellinen asema) • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antama tulos
Automaattinen nopeusohjaus	<ul style="list-style-type: none"> • Vallitseva nopeusrajoitus • Sademäärä • Veden / lumen esiintyminen tienpinnalla • Mustan jään esiintyminen tienpinnalla • Tienpinnan kitka • Näkyvyys • Tuuli: nopeus, suunta, puuskaisuus

2.2 Liikennetietojärjestelmien tietotarpeet

Siinä missä tieviranomaiset yrittävät maksimoida teiden käyttöasteen, tienkäyttäjät yrittävät yleensä löytää optimaalisen reitin lähtöpaikasta haluamaansa määräpaikkaan. Tämä optimaalisuus voidaan määritellä esimerkiksi minimimatka-aikana. Liikennetietojärjestelmät auttavat tienkäyttäjää optimaalisen reitin valinnassa ja niiden tarkoituksena onkin tarjota tienkäyttäjille heidän tarvitsemansa informaatio niillä rajoituksilla, joita liikenteenhallinta- ja ohjausjärjestelmät asettavat. (Westerman 1995.)

Jotta liikennetietojärjestelmä voisi tarjota tietoa optimaalisesta reitistä yhtä aikaa useille ajoneuvoille, sen on saatava liikennetiedot koko matkalta lähtöpisteen ja määräpaikan välillä, viivytykset tavallisella reitillä, vaihtoehtoisten reittien matkajat sekä tietoa vaihtoehtoisista kulkutavoista lähtöhetkellä. Kuljettajat ovat kiinnostuneita reitin eri osista eri ajankohtina ja haluavat tietoja kullakin hetkellä ajankohtaisesta tieverkon osasta lyhyen aikavälin ennusteineen hetkittäisen tiedon sijaan. Liikennetietojärjestelmälle riittävät siis suhteellisen harvaan saadut päivitykset liikennetilanteista. (Westerman 1995.)

Liikennetietojärjestelmien kannalta on tärkeintä tarjota tienkäyttäjälle tietoa sen hetkisistä liikenneolosuhteista reitin alusta aina reitin loppuun asti. Tässä reaaliaikainen linkin keskinopeus tai matka-aika ovat tärkeimmät komponentit. Liikennetietojärjestelmä tarvitsee tietoa myös sellaisista liikenteen häiriöistä, jotka aiheuttavat huomattavia viivytyksiä (Westerman 1995). Taulukossa 2 on esitetty erilaisten automaattisten liikennetietojärjestelmien tietotarpeet (Kulmala & Luoma 1998). Kuten taulukosta voidaan havaita, liikenneinformaatiojärjestelmillä voidaan antaa tietoa hyvin erilaisista asioista, minkä takia myös järjestelmien tietotarpeet vaihtelevat erittäin paljon.

Taulukko 2. Erilaisten automaattisten liikennetietojärjestelmien tietotarpeet (Kulmala & Luoma 1998).

Liikennetietojärjestelmä	Tietotarpeet
Dynaaminen informaatio tietöistä	<ul style="list-style-type: none"> • Tietöiden paikka tieverkolla • Tietöiden alkamis- ja päättymisajankohta • Informaatio kiertoreiteistä • Liikenteelle aiheutuvat viivytykset: keskiarvo
Dynaaminen informaatio erikoistapahtumista	<ul style="list-style-type: none"> • Tapahtumien paikka tieverkolla • Tapahtumien alkamis- ja päättymisajankohta • Informaatio kiertoreiteistä • Liikenteelle aiheutuvat viivytykset: keskiarvo
Dynaaminen informaatio liikennetilanteista	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärät ajoneuvoluokittain • Pistenopeus: keskiarvo ja keskihajonta • Varausaste • Linkkikohtaiset matka-ajat • Jononpituus
Dynaaminen informaatio onnettomuuksista ja häiriöistä	<ul style="list-style-type: none"> • Poliisien ym. antamat raportit • Jononpituus • Valvontakameran kuva • Automaattisen häiriöidenhavaitsemisalgoritmin antama tulos
Dynaaminen informaatio rajoituksista	<ul style="list-style-type: none"> • Niiden tienkäyttäjien erottaminen, joita rajoitus koskee • Rajoituksen sijainti tieverkolla • Rajoituksen alkamis- ja päättymisajankohta • Informaatio kiertoreiteistä • Liikenteelle aiheutuvat viivytykset: keskiarvo
Dynaaminen informaatio paikallisista varoituksista	<ul style="list-style-type: none"> • Riippuu varoituskriteeristä (eläimet, jalankulkijat, sää, ruuhka jne.)
Dynaaminen informaatio kelistä ja säästä	<ul style="list-style-type: none"> • Lämpötila: ilma, tie, maaperä, kastepiste • Sademäärä • Lumen / veden esiintyminen tienpinnalla • Mustan jään esiintyminen tienpinnalla • Tienpinnan kitka • Näkyvyys • Tuuli: nopeus, suunta, puuskaisuus
Dynaaminen ympäristön-tilainformaatio	<ul style="list-style-type: none"> • Konsentraation taso: PM10, NO_x, PAH, CO, otsoni, ilman hiukkaset: paikallinen tai alueellinen keskiarvo
Dynaaminen reitti-informaatio	<ul style="list-style-type: none"> • Liikennemäärä • Linkki- tai väyläkohtainen matka-aika • Jononpituus

3 Liikenteen mittausmenetelmät

3.1 Kiinteät ilmaisimet

3.1.1 Pneumaattinen letkuilmaisim

Pneumaattinen letkulaskuri on eräs vanhimmista ilmaisintyypeistä. Yksinkertaisimmillaan se koostuu ontosta kumiletkusta, joka on suljettu pienillä ilmaventtiileillä, jotka estävät paineaallon heijastumisen putkessa ja joista toinen on kiinnitetty ilmatiiviiseen suojakuoreen liikkuvalla kalvolla. Letkun yli ajava autonrenkas aiheuttaa letkuun paineaallon, joka leviää kuoreen kalvon välityksellä. Kalvo liikahtelee ja toimii mekaanisesti sähkökatkaisijana. Pneumaattisia letkulaskureita käytetään yleensä liikennemäärän mittaamiseen, mutta myös nopeuksien mittaaminen on mahdollista, jos letkuilmaisimet asennetaan pareittain. (Luku 3.1.1 perustuu viitteeseen Westerman (1995).)

Tällainen ilmaisin on edullinen eikä se ole erityisen herkkä virheilmaisuille. Ilmaisimen heikkouksia ovat saasteiden vaikutus ilmaisimeen ja sähkökatkaisijan paikaltaan pois siirtyminen. Ilmaisin ei ole myöskään erityisen pitkäikäinen. Ilmaisinta voidaan parantaa korvaamalla liikkuva kalvo pietsosähköisellä elementillä. Pneumaattisia letkuilmaisimia käytetään pääasiassa tilapäisissä mittauskohteissa.

3.1.2 Koaksiaali-ilmaisim

Koaksiaalikaapelin ylittävä autonrenkas muuttaa kaapelin eristeen muotoa ja saa näin aikaan eron kaapelin sisä- ja ulkopinnan sähköpotentiaalissa. Koska energiataso on hyvin alhainen, syöteimpedanssin täytyy olla suuri. Myös koaksiaali-ilmaisinta käytetään yleensä liikennemäärän mittaamiseen, mutta nopeuksien mittaaminen on mahdollista, kun kaapelit asennetaan pareittain. (Westerman 1995, Dalgleish 1994.)

Koaksiaalikaapeli on eräs huomaamattomimmista ilmaisimista eikä se sen takia juurikaan vaikuta liikennevirtaan. Kaapeli on kestävä ja tarvitsee vähän hoitoa, mutta vaatii herkän vahvistimen, joka nostaa kustannuksia. Koaksiaali-ilmaisimen käyttöikä on samaa luokkaa kuin pneumaattisen letkulaskurin. (Westerman 1995.)

3.1.3 Infrapunailmaisim

Passiivinen infrapunailmaisim havaitsee ajoneuvon tämän lämpöenergian avulla. Laajemmankin alueen monitorointi on mahdollista. Ilmaisimen haittapuoli on se, että sellaiset ajoneuvot, jotka ovat saman lämpöisiä ympäristönsä kanssa, eivät tule havaituiksi. Ilmaisin on herkkä sumun, lumen ja kovan vesisateen aiheuttamille häiriöille. (Dalgleish 1994.)

Havaitsemiseen käytetään tavallisesti infrapunälähetintä ja fotosähköistä kennon. Aktiiviset infrapunailmaisimet havaitsevat ohittavan ajoneuvon, kun niiden lähettämä valonsäde katkeaa. Jotta ilmaisin saadaan pidettyä mahdollisimman yksinkertaisena, komponentit on sijoitettu yleensä yhteen ja liitetty heijastimeen. Korkeuden mittauksissa käytetään usein horisontaalista asennustapaa. Tällöin ilmaisin on siis sijoitettu vaakasuoraan ja ajoneuvo, jonka korkeus ylittää ilmaisimen asennuskorkeuden, tulee havaituksi. Havaintoja ei voi tehdä kaistoittain. Eräs tapa tehdä kaistoittaisia mittauksia on asentaa ilmaisin tiehen, mutta tällöin mittaukset voivat kärsiä liasta ja kelistä. (Westerman 1995.)

Jos sopivaa asennuspaikkaa ei ole olemassa, ilmaisin vaatii pylväiden tai portaalien asentamista, mikä on kallista ja voi vaarantaa liikenteen turvallisuutta tai pienentää välityskykyä. Ilmaisimen heikkouksia ovat myös linssin alttius valolle ja fotosähköisen kennon herkkyys ilmansaasteille, muutoksille luonnonvalossa ja kosteudelle. Lisäksi ilmaisimen luotettavuus on suhteellisen huono suurilla liikennemäärillä. (Westerman 1995.)

3.1.4 Tutkailmaisin

Tutkailmaisimet on kehitetty nopeuksien mittaamiseen. Doppler-ilmiön takia liikuvasta objektista heijastuvan signaalin aallonpituus tai taajuus eroavat alkuperäisen signaalin aallonpituudesta tai taajuudesta. Tämä muutos on verrannollinen liikkuvan ajoneuvon suhteelliseen nopeuteen. Mittauskulma voi olla noin 20 astetta, jos halutaan mitata yksittäisiä ajoneuvoja. Jos taas halutaan määrittää esimerkiksi virran keskinopeus, kulman täytyy olla pienempi. Tutkailmaisimella voidaan mitata liikennettä joko tiensuuntaisesti tai suorassa kulmassa tiehen nähden. Tämän ilmaisinyhjän heikkous muihin ilmaisimiin nähden on se, että se on muita herkempi ilkevallalle. (Westerman 1995, Dalglish 1994.)

Eräs tutkatyyppi ovat laser-ilmaisimet. Laser-ilmaisimissa on erittäin ohut valosädekimppu, joka mahdollistaa ajoneuvojen sijainnin määrittämiseen tiellä tai ajoneuvon muotojen mittaamiseen muutaman tuuman tarkkuudella. Laser-ilmaisinta voidaan käyttää ajoneuvojen nopeuden ja liikennemäärän mittaamiseen sekä ajoneuvojen luokitteluun. Sitä voidaan käyttää myös liikennetiheyden tai esimerkiksi jonon pituuden määrittämiseen (Myers 1996, Dalglish 1994). Laser-tutkaa voidaan käyttää myös yksittäisten ajoneuvojen tunnistamiseen. Laser-tutka sijoitetaan tällöin ajoradan yläpuolelle ja säädetään mittaamaan alitse ajavan ajoneuvon korkeus lyhyin aikaväleihin. Tulokseksi saadaan ajoneuvon korkeus-pituusprofiili, jonka avulla ajoneuvo voidaan tunnistaa toisessa samanlaisessa mitauspisteessä (Anantharam 1998, Kühne 1991).

3.1.5 Ultraääni-ilmaisin

Sähkömagneettisten tutka-aaltojen sijaan ultraääni-ilmaisimet lähettävät ultraääniaaltoja. Käytössä on sekä jatkuvia että pulssimaisia aaltoja. Jatkuvia aaltoja käyttävien ilmaisimien toimintaperiaate on sama kuin tutkailmaisimilla, paitsi että aallot etenevät valon nopeuden sijaan äänen nopeudella. Ajoneuvosta takaisin heijastuvan äänen nopeus ja taajuus mahdollistavat ilmaisimen ja ajoneuvon vä-

lisen etäisyyden mittaamisen. Pulssimaisilla aalloilla voidaan havaita myös liikku-mattoman ajoneuvon läsnäolo. Ilmaisimen heikkous on se, että sen tarkkuus saattaa kärsiä lämpötilan muutosten ja tuulen aiheuttamista vaihteluista äänen etenemisnopeudessa. Tunneliin asennettu ultraääni-ilmaisim saattaa myös kärsiä ääniaaltojen heijastumisesta, mutta näiden häiriöiden suodattaminen on mahdol-lista. Pystysuoraan tien yläpuolelle asennettu ilmaisim pystyy mittaamaan ajo-neuvojen korkeudet, mikä mahdollistaa yksinkertaisen ajoneuvojen luokittelun. (Westerman 1995, Dalglish 1994, Aikawa ym. 1998.)

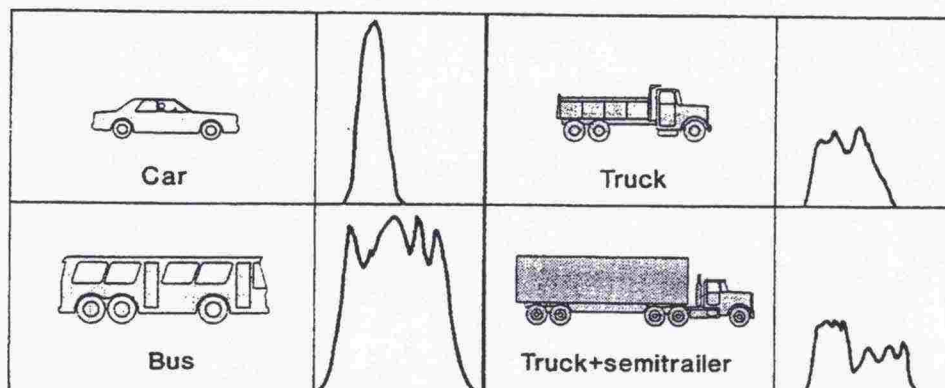
3.1.6 Akustinen ilmaisim

Myös tavallista mikrofonia voidaan käyttää liikenteen ilmaisimena monissa erilai-sissa luokittelu- ja arviointitehtävissä. Akustisesta ilmaisimesta yritetään kehittää vaihtoehtoa induktioilmaisimille ajoneuvojen havaitsemisessa ja niiden nopeuk-sien määrittämisessä muun muassa erilaisissa liikenteenhallinta-, ohjaus- ja in-formaatiojärjestelmissä sekä häiriöidenhavainnointijärjestelmissä. Menetelmän etuna ovat kohtuuhintaiset laitteet. Signaalin käsittelyssä voidaan käyttää apuna esimerkiksi neuroverkkoja. Menetelmä on uusi ja sitä testataan parhaillaan Ruot-sissa. (Stenberg 1999.)

3.1.7 Induktioilmaisim

Kiinteissä mittauspisteissä käytetään useimmin induktioilmaisimia. Ilmaisim muo-dostuu tiehen leikatusta käämistä (yleensä 1,5 m pitkä ja 1,8 m leveä suorakai-de), joka koostuu useista kierroksista eristettyä kuparilankaa. Käämiin muodos-tuu sähkömagneettinen kenttä ja, kun tietty määrä metallia (esimerkiksi ajoneu-vo) ylittää ilmaisimen, ilmaisimeen syntyy induktiovirta. Tämä kasvattaa häviöitä käämissä ja häviöresistanssi kasvaa. Lisäksi ajoneuvon metallin läsnäolo keskit-tää magneettikenttää, mikä taas kasvattaa itseinduktiota. Sähköpiiri havaitsee nämä muutokset ja näin ajoneuvon läsnäolon. Muutokset voidaan mitata usealla eri tavalla, kuten resonanssitaajuuden muutoksena tai vaihekulman kasvuna. Il-maisim on rakennettu siten, että se osaa suodattaa pois hitaat, ympäristöstä joh-tuvat muutokset. Tästä syystä kuitenkin esimerkiksi paikallaan oleva ajoneuvo ei enää tule havaituiksi tietyn ajan kuluttua. Tätä aikaa kutsutaan palautumis-ajaksi ja se vaihtelee ilmaisintypistä ja tarkoituksesta (liikennevalot, moottoritie jne.) toiseen muutamista minuuteista useisiin tunteihin. (Westerman 1995, Dal-glish 1994.)

Kahdella lähekkäin asennetulla induktioilmaisimella voidaan määrittää neljä ajankohtaa, jolloin ajoneuvo joko saapuu silmukalle tai poistuu sen päältä. Nämä neljä ajankohtaa mahdollistavat ajoneuvon nopeuden, pituuden ja ohitusajan mittaamisen. Kehittyneemmät induktioilmaisimet tunnistavat myös ajoneuvotyy-pin (kuva 2). Tämä on selvä etu muihin infrastruktuuriin perustuviin ilmaisimiin nähden. (Westerman 1995.)



Kuva 2. Ajoneuvojen luokittelu induktioilmaisimen signaalin perusteella (Pursula & Pikkarainen 1994).

Yksittäiset ajoneuvot voidaan tunnistaa induktioilmaisimien avulla "sormenjälkiensä" eli induktioilmaisimessa kullekin ajoneuvolle ominaisen induktion muutoksen perusteella. Menetelmän huonoja puolia on, että se vaatii näiden sormenjälkien yksityiskohtaista tutkimista ja että sormenjäljet taas ovat riippuvaisia signaalin rakenteesta. Esimerkiksi matka-aikoja voidaan määrittää myös tunnistamalla yksittäisten ajoneuvojen sijaan ajoneuvoryhmien sormenjäljet. Tällä tavoin yksittäisten ajoneuvojen tunnistaminen ei ole tarpeen ja menetelmä sallii pienet epätarkkuudet. Menetelmä voi aiheuttaa ongelmia ramppien läheisyydessä, koska tällaisilla alueilla ajoneuvojonojen kokoonpano voi muuttua merkittävästi. Menetelmän haittapuoli on myös se, että ilmaisimien välisen etäisyyden täytyy olla suhteellisen pieni. (Haugen 1996, Kühne 1991a ja b.)

Induktioilmaisimet ovat kestäviä ja luotettavia, koska silmukat on asennettu tiehen eivätkä ne näin ole juurikaan tekemisissä ulkoisten häiriöiden kanssa. Käytännössä ilmaisimissa kuitenkin ilmenee toimintahäiriöitä. Erityisesti sellaisissa paikoissa, joissa tapahtuu paljon kaistalta toiselle vaihtamista tai ajoneuvot ajavat hyvin hitaasti, ilmaisimet eivät kykene havaitsemaan kaikkia ajoneuvoja. Ilmaisimien asennuskustannukset ovat suhteellisen korkeat ja asentaminen häiritsee liikennettä. (Westerman 1995, Dalglish 1994.)

3.1.8 Magnetometri

Magnetometri on aktiivinen ajoneuvoilmaisimien, joka mittaa vaihteluita maan magneettikentässä, kun ajoneuvo ylittää ilmaisimen. Magnetometrejä käytetään induktioilmaisimen sijaan silloilla ja voimakkaasti vahvistetuilla betonialustoilla. Hintatasoltaan magnetometri on muihin ilmaisimiin verrattuna keskiluokkaa. (Dalglish 1994.)

3.1.9 Videoilmaisimien

Videoilmaisimet ovat suhteellisen uusi ilmaisintyyppi, vaikka niitä onkin käytetty jo pitkään erikoiskohteissa, kuten tunneleissa. Videojärjestelmiä voidaan käyttää joko korvaamaan muun tyyppiset ilmaisimet tai täydentämään näitä (Westerman

1995, Dalglish 1994). Videokameraa voidaan käyttää ilmaisimena karkeasti sanottuna kolmella eri tavalla. Ensimmäinen menetelmä matkii silmukkalmaisimien toimintaa, jolloin keskitytään tarkastelemaan tiettyjä pikseliryhmiä kuvaruudulta. Tällöin ilmaisimen avulla saadaan tietoja liikennemääristä, keskinopeuksista, aikaväleistä, varausasteista ja ajoneuvojen pituuksista. Data vastaa siis induktioilmaisimien avulla saatua dataa. Toinen menetelmä on suunniteltu tiettyä kaistaa ajavien ajoneuvojen tai ajoneuvojonojen havaitsemiseen ja seuraamiseen. Monikaistaisilla maanteillä samaa menetelmää sovelletaan kullekin kaistalle erikseen. Kolmannen menetelmän avulla voidaan paikallistaa ja seurata yksittäisiä ajoneuvoja liikennevirrasta. Tällöin saadaan sekä aikaan että tilaan sidottuja liikenneparametreja (Hoose 1991).

Videokamerailmaisimen etu muihin menetelmiin verrattuna on yksityiskohtaisemman ja tarkemman tiedon saantimahdollisuus lisäanalysoimalla tallennettua dataa. Etuna on myös se, että videokamera on helppo ja edullinen asentaa siltoihin ja muihin hankaliin kohteisiin. Toisissa kohteissa tosin vaatimus kameran sijoittamisesta ajoradan yläpuolelle voi aiheuttaa hankaluuksia ja tärinä saattaa hankaloittaa mittauksia. Itse laite tosin on suhteellisen kallis ja se on erittäin herkkä ilki-
vallalle, säävaihteluille ja saasteille. Menetelmän toisena etuna on se, että videon avulla saadaan mitattua sellaisia parametreja, joita muut ilmaisimet eivät kykene mittaamaan, kuten yksittäisten ajoneuvojen rekisteritunnuksia, jonon pituuksia, ajoneuvojen kulkua liittymissä, ruuhkaa ja paikallisia liikenteen häiriöitä. (Hoose 1991, Westerman 1995, Dalglish 1994.)

Kvanttulantamennetelmät voidaan jakaa liikkeen tunnistamiseen ja ajoneuvojen tunnistamiseen. Liikkeen tunnistusta käytetään usein liikkuvien ajoneuvojen erotamiseen paikallaan olevista ajoneuvoista. Suorassa ajoneuvon tunnistuksessa ajoneuvot tunnistetaan taustastaan tiettyjen ominaispiirteidensä avulla. Näin saadaan tunnistettua liikennevirran poikkeavuudet suhteellisen pitkältä tiejaksolta. Rekisteritunnusmenetelmällä saadaan tietoja matka-ajoista. (Westerman 1995.)

3.1.10 Ajoneuvojen tunnistamisesta yleisesti

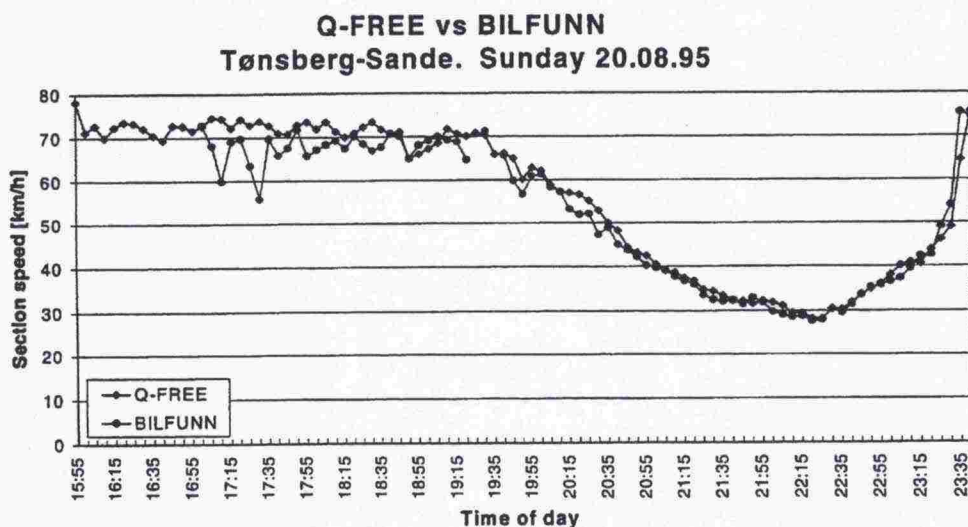
Anturijoneuvoja ja muutamaa muuta menetelmää lukuun ottamatta suurin osa linkkidatan mittausten menetelmistä perustuu ajoneuvon tunnistamiseen kahdessa tai useammassa pisteessä tutkittavalla tiejaksolla. Kussakin mittauspisteessä ajoneuvon erityispiirteet tallennetaan yhdessä kellonajan kanssa. Ajoneuvojen tunnistaminen tehdään pääasiassa jommallakummalla kahdesta päämenetelmästä.

- **Absoluuttinen tunnistaminen** tarkoittaa sitä, että jokainen ajoneuvo tunnistetaan kussakin mittauspisteessä yksiselitteisesti, kuten rekisteritunnuksen tai yksilöidyn elektronisen tunnistimen avulla. Menetelmän etuna on se, että ajoneuvojen tunnistaminen tehdään varmasti, jolloin ei ole vaaraa, että ajoneuvot sekoitetaan keskenään ja näin syntyisi virheitä kerättävään dataan. Tämän tyyppinen tunnistaminen saattaa kuitenkin rikkoa yksilösuojaa ja tietojen keräämiseen täytyy olla lupa.

- **Suhteellinen tunnistaminen** tarkoittaa sitä, ettei ajoneuvoja tunnisteta yksiselitteisesti. Tämä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, esimerkiksi ajoneuvon fyysisten ominaisuuksien kuten akselipohjan, akseleiden lukumäärän, renkaiden pohjan, akselipainojen tai ajoneuvon kokonaispainon perusteella. Suhteellinen tunnistaminen voidaan tehdä myös absoluuttisen tunnistamisen keinoin rekisteröimällä vain osa rekisteritunnuksesta tai elektronisesta tunnistuksesta, jolloin tallennetta ei voi yksiselitteisesti yhdistää mihinkään tiettyyn ajoneuvoon. Suhteellinen tunnistaminen ei yksilöi ketään ja siksi siihen ei tarvita lupia tienkäyttäjiltä. Toisaalta ajoneuvon virheellisen tunnistamisen riski on olemassa ja tämän takia algoritmin, joka yhdistelee ajoneuvotiedot ja muuttaa ne linkkidataksi, täytyy olla pidemmälle kehitetty. (Luku 3.1.10 perustuu viitteeseen Haugen (1996).)

Se, onko absoluuttisella tunnistamisella merkittäviä etuja suhteelliseen tunnistamiseen verrattuna, riippuu useista erilaisista seikoista, kuten liikennemäärän suhteesta välityskykyyn, mittauspisteiden välimatkasta, ohitusten määrästä ja niiden ajoneuvojen osuudesta kokonaisliikenteestä, jotka ohittavat molemmat mittausasemat.

Haugen (1996) on vertaillut sähköisen tunnistimen ja fyysisten ominaisuuksien perusteella tapahtuvaa tunnistamista (kuva 3). Fyysisten ominaisuuksien perusteella tapahtuvan tunnistamisen havaittiin antavan hyviä tuloksia. Parhaat tulokset saatiin silloin, kun liikennevirta oli vakaa ja mittauspisteiden välinen etäisyys pieni. Kuvasta 3 voidaan havaita, että menetelmien välillä on suhteellisen pieniä eroja.



Kuva 3. Sähköisen tunnistimen (Q-free) ja fyysisten ominaisuuksien (Bil-funn) perusteella tapahtuvan tunnistamisen välinen vertailu (Haugen 1996).

3.1.11 Kiinteiden ilmaisimien välinen vertailu ja arviointi

Pneumaattinen letkulaskuri ja koaksiaalikaapeli ovat tekniikoina vanhentuneita ja kelpaavat vain tilapäisiin mittauksiin. Infrapunailmaisimet ovat herkkiä saasteille,

luonnonvalon muutoksille ja kosteudelle ja niiden luotettavuus on suurilla liikennemäärillä huono. Tutkan ja ultraäänen avulla kerätyn datan laatu on riittävän hyvä liikenteenohjausjärjestelmille, mutta ajoneuvojen luokittelu ei ole näillä ilmaisimilla erityisen tarkkaa. Akustisista ilmaisimista luvataan vaihtoehtoa induktioilmaisimille, mutta menetelmä on vielä kehitysasteella. Magnetometri toimii induktioilmaisimen tapaan. Kehittyneet induktioilmaisimet täyttävät kaikki liikenteenohjauksen asettamat vaatimukset ja niitä on testattu paljon. Haittana ovat kuitenkin korkeat asentamiskustannukset ja joskus esiintyvät merkittävät mitausvirheet. Videoilmaisimien avulla voidaan mitata monimutkaisia liikennetilanteita sekä matka-aikoja, joita ei voi muilla ilmaisimilla mitata suoraan. Videoilmaisimet eivät kuitenkaan vielä vakuuta ilmaisinalintana, koska ne ovat kalliita ja herkkiä ilkeivallalle sekä sään ja saasteiden vaikutuksille. Vaikuttaa siltä, että videokamerat voisivat olla pidemmällä aikavälillä varteenotettava tekniikka. Induktioilmaisimien kannattaa siis vielä valita pitkän tähtäimen liikenteenohjausjärjestelmien liikenteenmonitorointijärjestelmäksi. (Westerman 1995.)

Kiinteiden ilmaisimien heikko puoli on se, että ne mittaavat yleensä poikkileikkauskohtaisia parametrejä, kun taas monet sovellukset tarvitsevat reaaliaikaisia linkkikohtaisia tietoja vallitsevasta liikennetilanteesta. Toisin sanoen kiinteät ilmaisimet mittaavat liikenneprosessin ajallisia muutoksia jossain tietyssä pisteessä, mutta sovellukset tarvitsevat tietoa sekä ajallisista että paikallisista muutoksista koko liikenneverkolla (Hoose 1991, Westerman 1995). *Taulukossa 3* on esitelty erilaisten parametrien monitorointiin Pohjoismaissa ja Saksassa käytettyjä menetelmiä (Kulmala & Luoma 1998).

Taulukko 3. Erilaisten parametrien monitorointiin käytettyjä menetelmiä (Kulmala & Luoma 1998).

Monitoroitava parametri	Monitorointimenetelmät
Poikkileikkauskohtaiset liikennettä kuvaavat parametrit (liikennemäärä, nopeus, varausaste, aikaväli, ajoneuvon pituus, paino)	Induktioilmaisain, tutka, automaattinen punnitusasema, videoilmaisain
Linkkikohtainen matka-aika	Anturiaajoneuvot, automaattinen punnitusasema, automaattinen ajoneuvon tunnistusjärjestelmä
Jononpituus	Valvontakamera, induktioilmaisimet
Automaattinen häiriöiden havainnointi	Valvontakamerat, joissa on häiriöiden havaitsemisjärjestelmä, induktioilmaisimet; myös anturiaajoneuvot, automaattinen punnitusasema, automaattinen ajoneuvon tunnistusjärjestelmä
Manuaalinen häiriöiden havainnointi	Viranomaisten ja tienkäyttäjien raportit, valvontakamerat
Yksittäisten ajoneuvojen nopeus	Induktioilmaisimet, tutka, videoilmaisimet
Yksittäisten liikennevalojen noudattaminen	Valo-ohjaukseen liitetyt induktioilmaisimet, videoilmaisain
Vaaralle alttiiden tienkäyttäjien läsnäolo	Mikroaaltoilmaisain
Eläimien läsnäolo	Infrapunailmaisain, mikroaaltoilmaisain
Informaatio tietöistä	Viranomaisten raportit
Informaatio tapahtumista	Viranomaisten ja tienkäyttäjien raportit
Informaatio rajoituksista	Viranomaisten raportit
Vapaat parkkipaikat	Varausastetiedot pysäköinnin järjestäjiltä
Tieto tietulleista	Viranomaisten raportit
Poikkileikkauksen tiesääntieto	Tiesääasema, näkyvyys- ja sääilmaisimet, valvontakamerat, tuulimittarit
Poikkileikkauksen kelitieto (lämpötila, jää, vesi)	Lämpötilailmaisain, tiesääasema, valvontakamera
Jatkuva tieto tienpinnan kunnosta tietä pitkin (kitka, lämpötila, jää, vesi)	Anturiaajoneuvot
Alueellinen tai paikallinen ilman laatu -informaatio (PM10, NO _x , PAH, CO, otsoni)	Ympäristöilmaisimet

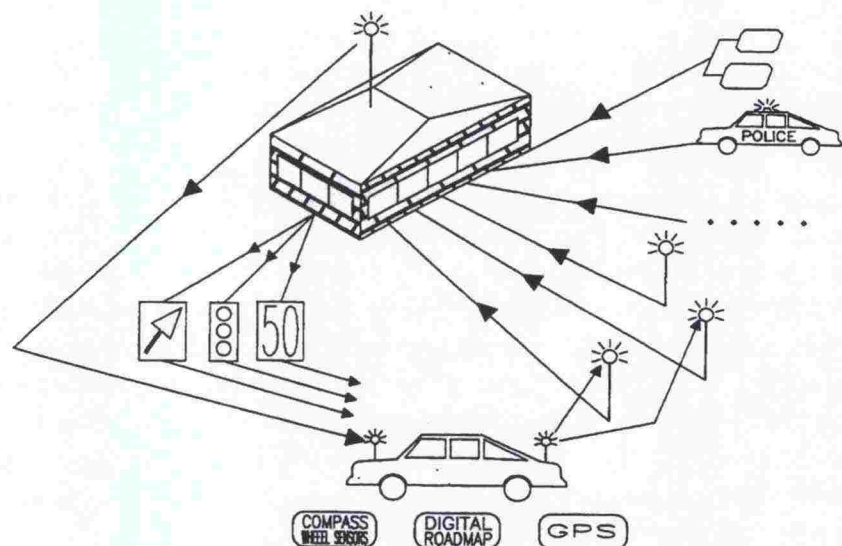
3.2 Anturiajoneuvot

3.2.1 Anturiajoneuvojärjestelmät ja anturiajoneuvot

Eräs innovatiivinen tapa kerätä tietoja liikenteestä on käyttää ajoneuvoja itseään reaaliaikaisten tietojen keräämiseen liikkuvina antureina. Tämä periaate keksittiin Japanissa jo 1970-luvun alussa. (Westerman 1995.)

Nykypäivän ajoneuvon sisäisten laitteiden kehitys alkoi automaattisista navigointilaitteista (kuten AUTO-SCOUT tai TravelPilot) ja järjestelmistä, jotka toimittavat oikea-aikaista liikennetietoa (kuten RDS-TMC). Staattisten navigointijärjestelmien ja dynaamisten liikennetietojärjestelmien yhdistelmästä kehitettiin ensimmäiset dynaamiset navigointi- tai opastusjärjestelmät, jotka perustuivat yksisuuntaiseen tiedonsiirtoon. Järjestelmät kehittyivät nopeasti siten, että tiedonsiirrosta kehitettiin kaksisuuntainen (duaalimoodi- tai dynaamiset reittiopastusjärjestelmät). Tällöin liikennekeskukset saattoivat lähettää ajoneuvoille tietoja liikennetilanteesta ja ajoneuvot kertoa liikennekeskukselle liikennetilanteestaan. (Westerman 1995.)

Kuva 4 esittää anturiajoneuvojärjestelmän yleisen toimintaperiaatteen, jossa anturiajoneuvot, muut havainnoijat kuten poliisi tai tienpitäjät, ja kiinteät ilmaisimet keräävät liikennetiedot. Anturiajoneuvoissa on erityiset laitteet sijainnin määrittämiseen ja liikennetilanteesta tehtyjen havaintojen tallentamiseen. Sijainninmäärittäyslaitte pitää kirjata ajoneuvon sijainnista ja tietoliikennelaite lähettää liikennetiedot liikennekeskukseen, jossa tiedot kootaan ja analysoidaan. (Westerman 1995.)



Kuva 4. Anturiajoneuvojärjestelmän yleinen toimintaperiaate (Westerman 1995).

Anturiajoneuvot toimivat liikkuvina liikenteenilmaisimina eikä niitä ole sidottu mihinkään tiettyyn paikkaan tieverkolla. Tämän takia anturiajoneuvot määritellään ei-infrastruktuuriin perustuviksi ilmaisimiksi. Anturiajoneuvot voivat olla osa moni-

puolista reittiopastusjärjestelmää tai ne on voitu varustaa nimenomaan liikenteen monitorointia varten. (Westerman 1995.)

Koska kahden pisteen välinen matka-aika on pistenopeuksia luotettavampi liikennetilanteen kuvaaja, liikenteen seassa liikkuvat ja automaattisesti eri linkkien matka-ajat raportoivat anturiajoneuvot ovat arvokkaita tietolähteitä. Silloin kun anturiajoneuvot ovat osa monipuolista reittiopastusjärjestelmää, tietoja voidaan kerätä myös suoraan lähtöpaikka-määräpaikkaperiaatteella (Westerman 1995). Nykyään myös esimerkiksi kuljetusliikkeet käyttävät vastaavaa tekniikkaa ajoneuvojensa sijainnin määrittämiseen. Tällöin ajoneuvon sijaintikoordinaatit voidaan määrittää millä hetkellä tahansa GPS-vastaanottimen (GPS = Global Positioning System) saaman signaalin ja digitaalisen kartan perusteella. Menetelmä on riippumaton tienvarsilaitteistoista (Haugen 1996).

Jokainen anturiajoneuvo on varustettu laitteistolla ja ohjelmistolla, jotka mittaavat ja tallentavat ajoneuvon nopeuden ja nopeuden mittaajankohdan. Tarvittavat peruslaitteistot (kuten nopeusmittari ja kello) löytyvät jokaisesta ajoneuvosta ja ne tarvitsevat vain pieniä muutoksia annetun tehtävän suorittamiseen. Edellä mainittujen laitteiden lisäksi ajoneuvoon pitää asentaa pieni lähetin, joka välittää tiedot liikennekeskukseen. Nykyisen ja kohteena olevan sijainnin ilmentämiseen tarvitaan digitaalinen kartta alueesta, jolla ajoneuvo liikkuu. Tällaiset kartat ovat kuitenkin lisälaitteita. Tavallisen ajoneuvon muuttaminen tavalliseksi anturiajoneuvoksi ei ole kallista (joitain satoja dollareita), kun kustannuksia verrataan kiinteisiin ilmaisimiin. Dynaaminen reittiopastusjärjestelmä maksaa kuitenkin jo selvästi enemmän. (Westerman 1995.)

3.2.2 Anturiajoneuvon sijainnin määrittäminen

Anturiajoneuvon sijainnin määrittämiseen löytyy useita erilaisia tekniikoita. Kaikki olemassa olevat menetelmät ovat muutaman perustekniikan sovelluksia tai yhdistelmiä.

Merkintälasku. Ajoneuvon sijainti määritetään laskemalla kuljettu matka useissa eri suunnissa yhteen aikaisemman, tunnetun sijainnin kanssa. Kuljettu matka mitataan pyöriin asennettavilla sensoreilla ja kuljettu suunta sähköisellä kompassilla. Suunnan mittaamiseen käytetään myös renkaissa olevia sensoreita vertaamalla jatkuvasti oikean- ja vasemmanpuoleisten renkaiden kulkemaa matkaa. Näin saatuja kahta suuntaestimaattia verrataan toisiinsa, jotta saadaan kompensoitua sensoreiden virhe ja maan magneettikentässä tapahtuvat vaihtelut. Koska mitattu etäisyys ja suunta ovat edelleen vain karkeita estimaatteja, merkintälaskuteknikka kärsii kumuloituvasta virheestä, jonka suuruusluokka on usein noin neljä prosenttia kuljetusta matkasta.

Karttayhteensopivuus. Ajoneuvon sijainti määritellään sovittamalla edellä mainitulla tavalla arvioitua reittiä digitaaliseen tiekarttaan. Menetelmä on herkkä pienille virheille ajoneuvon kulkemassa reitissä, jos tieverkko on tiheälinkkinen (esim. kaupunkialueilla), mikä saattaa johtaa siihen, että ajoneuvon sijainti tulee määritellyksi väärin. Menetelmä ei toimi myöskään silloin, kun ajoneuvo ajaa karttaan merkitsemätöntä tietä pitkin. Nykyiset ajoneuvon sisäiset navigointijärjestelmät käyttävät merkintälasku- ja karttayhteensopivuustekniikoiden yhdistelmää.

Lähimajakkatekniikka. Ajoneuvon sijainti vahvistetaan sijainnin mukaan koodatuilla signaaleilla, joita strategiaan paikkoihin sijoitetut lyhyen kantaman lähettimet lähettävät. Tällaiset lähettimet sijoitetaan usein liikennevaloihin. Koska lähettimien kantosäde on lyhyt, niitä tarvitaan melkoisesti suuren alueen kattamiseen. Joissain paikoissa edellä mainitun kaltaisia lähimajakoita on käytetty myös dynaamiseen liikenne- tai reittitietojen lähettämiseen. Majakoiden välillä ajoneuvojen navigoinnissa on käytetty edellä selostettuja merkintälasku- ja karttayhteensopivuusmenetelmiä.

Kolmiomittaustekniikka. Ajoneuvon sijainti mitataan samanaikaisesti vähintään kolmesta kiinteästä lähteestä tulevien signaalien perusteella. Ajoneuvon etäisyys majakkaan lasketaan saapuneen signaalin viiveen perusteella. Ajoneuvon sijainti suhteessa majakkaan saadaan tällöin ympyrän kehänä ja todellinen sijainti kehien leikkauspisteestä. Jokainen lisäsignaali parantaa tuloksen tarkkuutta. Myös tieto siitä, että puhelin kulkee tietä pitkin, parantaa estimaatin tarkkuutta (Vuori ym. 1996). Jotta kolmiomittaustekniikkaa voitaisiin käyttää, seuraavien neljän ehdon tulee toteutua.

- Majakan sijainnin täytyy olla tunnettu. Tämä on erityisen tärkeää silloin, kun majakoina käytetään satelliitteja, jotka vaihtavat sijaintiaan jatkuvasti.
- Majakan sijainnin täytyy olla suotuisa tutkittavaan anturiajoneuvoon nähden.
- Käytettävän signaalin lähetysnopeuden täytyy olla tunnettu. Tämä saattaa olla vaikeaa, koska nopeus vaihtelee erilaisissa ilmakehissä.
- Ajoneuvojen signaalit eivät saa heijastella. Suuret rakennukset voivat olla esteenä satelliittien käyttämille lyhytaaltoisille signaaleille, mikä voi johtaa signaalien häviämiseen kokonaan tai heijastuneiden ja siten kiertoteitä tulneiden signaalien vastaanottamiseen. Maassa olevien majakoiden käyttämät pidempiaaltoiset signaalit saattavat heijastella ylhäällä kulkevista johdoista. (Westerman 1995.)

Differentiaaliset sijainninmäärittämismenetelmät, jotka korjaavat systemaattisia mittausrvirheitä, parantavat tuloksen tarkkuutta. Kaupunkialueilla tuloksen tarkkuus vaihtelee kuitenkin huomattavasti, mikä johtuu suurten rakennusten aiheuttamista heijastuksista ja muista häiritsevästä. Tästä syystä kolmiomittaustekniikkaa käytetään yhdessä merkintälasku- tai karttayhteensopivuustekniikan kanssa kaupunkialueiden läpinavigoinnissa. (Westerman 1995.)

Eräs mielenkiintoinen tapa määrittää anturiajoneuvojen sijainti on käyttää GSM-puhelimia antureina. Tällöin ajoneuvojen sijainnin määrittämiseen ja datan siirtoon käytetään olemassa olevaa matkapuhelinverkkoa. Anturiajoneuvoon ei siis tarvitse asentaa tunnistimia tai muita lisälaitteita, vaan kaikki ne ajoneuvot, joissa on matkapuhelin, ovat potentiaalisia anturiajoneuvoja. Ainoat muutokset, jotka täytyy tehdä, tehdään matkapuhelinverkon tukiasemiin. Toisin kuin perinteiset anturiajoneuvojärjestelmät, jotka on sidottu tietyille teille tai tiejaksoille, GSM-puhelimia antureina käyttävä järjestelmä voi antaa ajoneuvojen nopeustietoja muutaman sekunnin välein miltei tahansa peittoalueensa tieltä, jolla liikkuu matkapuhelimien käyttäjiä (Larsen 1996). Yhdysvalloissa ajoneuvojen paikallistamista matkapuhelimien avulla ryhdytään soveltamaan hätäpuhelimien paikallistamiseen. Suomessa laki kieltää puhelimen sijainnin peilaamisen muilta kuin poliisilta.

3.2.3 Kysyntä- ja tarjontalähtöiset anturiajoneuvojärjestelmät sekä penetraatioasteen vaikutus järjestelmien toimintaan

Anturiajoneuvojen viestien lähettämistä voidaan joko koordinoida tai olla kokonaan koordinoimatta. Ensimmäisessä tapauksessa liikennekeskus kutsuu peittoalueellaan olevia anturiajoneuvoja peräkkäin, säännöllisen aikataulun mukaan ja pyytää niitä lähettämään liikennetietonsa. Tällaista keskitettyä koordinointia kutsutaan kysyntälähtöiseksi. Vastaavasti ei-koordinoitua anturiajoneuvojärjestelmää kutsutaan tarjontalähtöiseksi. (Luku 3.2.3 perustuu viitteeseen Westerman (1995).)

Kysyntälähtöisen lähestymistavan etuna on se, että liikennekeskus saa kaikki anturiajoneuvojen lähettämät viestit. Pahin haittapuoli on se, että liikennekeskuksen on tiedettävä ajoneuvojen kunkin hetkiset sijainnit tukiaseman peittoalueen sisällä saadakseen yhteydet ajoneuvoihin. Tarjontalähtöisen koordinoinnin edut ylittävät kysyntälähtöisen koordinoinnin edut. Toisaalta verkon tehokkuus on alhaisempi, koska osa viesteistä ei pääse liikennekeskukseen.

Alhaisella anturiajoneuvojen penetraatioasteella tarjontamalli näyttää olevan parempi kuin kysyntämalli. Tähän ovat syynä kehotusviestit. Kohtalaisella penetraatioasteella liikenneviestien määrä saavuttaa olemassa olevan tiedonvälityskapasiteetin. Tällöin tukiaseman läheltä lähetettäviä liikenneviestejä aletaan suosia kauempaa tulevien kustannuksella. Tästä on tuloksena se, että tarjontamallissa tukiaseman lähellä olevilla tielinkeillä läpäisyaste ylittää kysyntämallin läpäisyasteen, mutta koska kysyntämallin läpäisyaste on etäisyydestä riippumaton, kysyntämalli on parempi kauempana olevien linkkien kannalta.

Kun penetraatioaste nousee korkeaksi tukiaseman tehokas peittoalue kutistuu pieneksi. Tämän alueen sisällä viestien läpäisyprosentti on erittäin korkea, mutta laskee alueen ulkopuolella voimakkaasti ja muuttuu nopeasti erittäin alhaiseksi. Kysyntämallissa toiminta on kuitenkin vakaata, mikä merkitsee sitä, että tukiaseman lähellä läpäisymäärä on huomattavasti tarjontamallia alhaisempi ja vastaavasti kaukaisemmilla linkeillä korkeampi.

Yllä esitetyssä analyysissä lähetysten välinen aika on oletettu vakioksi. Sitä voidaan kuitenkin helposti säätää ja näin säilyttää penetraatioasteen ja lähetysten välisen ajan suhteen arvo optimissa. Tällä tavalla voidaan millä tahansa penetraatioasteella saavuttaa sama läpäisyaste kuin tarjontamallissa pienillä penetraatioasteilla. Jos lähetysten välistä aikaa kasvatetaan, anturiajoneuvot voivat lähettää pidemmän lähetysajan turvin yksityiskohtaisempia liikennereportteja tai liikennetietoja pidemmältä matkalta.

Anturiajoneuvoilla tapahtuvan datankeruun ohjaamiseen on myös olemassa seuraavanlaisia kriteereitä: tieluokka tai ajoneuvotyyppi, se, että anturiajoneuvot lähettävät vain tietyn osan viesteistään, että ne lähettävät liikenneviestejä ainoastaan, jos niiden nopeus poikkeaa riittävästi oletusarvosta, tai että ne lähettävät viestit korkeintaan tietyn aikavälein. Muita vaihtoehtoja ovat lähettämisprosessin säätäminen anturiajoneuvotiheyden perusteella, jolloin sellaiset anturiajoneuvot, jotka ovat vähäliikenteisillä teillä, lähettävät enemmän liikenneviestejä, ja vilkasliikenteisten teiden anturiajoneuvojen viestien lähettämistä rajoitetaan, tai liikenteen häiriöiden perusteella tapahtuva lähettämisprosessin säätäminen, jossa jär-

jestelmä vaatii enemmän liikenne-raportteja tietyltä tielinkiltä vähentämällä samalla muilta tielinkeiltä tulevien viestien määrää, jos kyseisellä linkillä epäillään olevan liikenteenhäiriötä.

Toinen havaittava etu, joka tarjontamallilla on kysyntämalliin verrattuna erityisesti alhaisilla penetraatioasteilla, on se, että tarjontamallissa tielinkkikohtainen läpäisyaste on selvästi riippuvainen linkin todellisesta liikennetiheydestä. Jos siis penetraatioasteen ja lähetysten välisen ajan suhde on sopiva, voidaan liikennevirran häiriöt havaita helposti liikennetiheyden kasvun perusteella. Tarjontamallin heikko puoli on "kätkeminen", joka tarkoittaa sitä, että vilkasliikenteisten lähilinkkien viestit peittävät kauempaa tulevat viestit. Vaikka tarjontamalli on yleisesti parempi kuin kysyntämalli, tilanne ei aina ole näin. Tapauskohtaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että tämä on liikenneolosuhteista riippuvaista.

3.2.4 Tarvittava anturiajoneuvojen määrä

Matka-aikadatan keräämisen kustannukset ja toisaalta laatu riippuvat tarvittavasta anturiajoneuvojen määrästä. Näin ollen kannattaa siis estimoida pienin mahdollinen anturiajoneuvojen määrä, jolla vielä saadaan luotettavia ja tarkkoja estimaatteja matka-ajoista koko tarkasteltavalla liikenneverkolla. Tarvittava anturiajoneuvomäärä on riippuvainen kohteena olevasta liikenneverkosta ja sen ominaisuuksista, kuten välityskyvystä ja liikennemäärästä. (Srinivasan & Jovanis 1996, Park ym. 1998.)

Srinivasan & Jovanis (1996) ovat selvittelleet tarvittavaa anturiajoneuvojen minimimäärää. Mitattujen matka-aikojen täytyy edustaa luotettavasti matka-aikoja liikenneverkolla. Anturiajoneuvojen minimimäärä (n_{min}) linkkiä kohti voidaan johtaa seuraavan yhtälön mukaiseksi.

$$n_{min} = \left\{ \frac{\Phi^{-1} \left[\frac{(1+r)}{2} \right]}{\varepsilon_{max} \left(\frac{\mu_{it}}{\sigma_{it}} \right)} \right\}^2$$

Yhtälössä Φ on kumulatiivinen (0, 1)-normaalijakauman kertymäfunktio, r on luotettavuustaso, ε_{max} on suurin sallittu suhteellinen virhe, μ_{it} on matka-ajan odotusarvo ja σ_{it} keskihajonta. Jos siis haluttu luotettavuustaso on 95 prosenttia ja suurin sallittu virhe 10 prosenttia, yhtälö supistuu seuraavaan muotoon.

$$n_{min} = \left[\frac{19,6}{\left(\frac{\mu_{it}}{\sigma_{it}} \right)} \right]^2$$

Kutakin linkkiä kohti tarvittavien anturiajoneuvojen minimimäärä on siis riippuvainen matka-ajan varianssista ja odotusarvosta. Nämä voidaan arvioida liikennedatan perusteella.

Srinivasan & Jovanis (1996) tarkastelivat myös on anturiajoneuvojen minimimäärää (N), joka riittää kattamaan tarkasteltavan alueen. Alueen kattaminen voidaan määritellä niiden linkkien osuutena (p), jotka anturiajoneuvot kattavat riittävän hyvin (ruuhkahuipun aikana). Tiettyjen teiden, kuten moottoriteiden ja muiden

pääteiden, matka-ajat ovat kiistämättä tärkeämpiä kuin pienten sivuteiden. Tästä syystä alueen kattaminen voidaan määritellä myös tieluokittain.

Srinivasan & Jovanis (1996) ehdottavat tehtävän ratkaisemiseksi seuraavanlaisia proseduuria. Määritellään anturiajoneuvojen minimimäärä kullekin linkille ja tehdään tarkasteltavalle liikenneverkolle dynaaminen liikenteen sijoittelu. Oetaan N :n kokoinen otos anturiajoneuvomatkoja kaikista ruuhkahuipun aikana tehtävistä matkoista ja sijoitellaan nämä anturiajoneuvomatkat verkolle. Määritellään se osuus linkeistä, jonka anturiajoneuvot kattavat riittävän hyvin. Keskiarvoistetaan linkkien katto yli kaikkien mittausjaksojen, jotta saadaan katettujen linkkien keskimääräinen osuus (p). Toistetaan simulointi samalle N :n arvolle, jotta p :lle saadaan luottamusväli. Koko simulointiprosessi toistetaan usealle N :n arvolle, kunnes löydetään p , joka on riittävän suuri. Jos haluttu osuus on määritelty erikseen eri tieluokille, simulointia jatketaan, kunnes kaikki kriteerit on täytetty.

Park ym. (1998) kritisoivat menetelmiä, joissa anturiajoneuvojen linkkienpeittokyky määritellään niiden linkkien osuutena, joilla anturiajoneuvot matkaavat tietyn aikajakson sisällä. Menetelmä toimii ainoastaan silloin, jos anturiajoneuvot ovat jakautuneet tasaisesti verkon linkeille. Vaikka anturiajoneuvojen keskimääräinen linkkienpeittokyky olisikin riittävän korkea, kaikkien linkkiryhmiä matkaa-ajat eivät kuitenkaan tule määritellyiksi anturiajoneuvojen avulla. Ongelma johtuu anturiajoneuvojen satunnaisesta ryhmittymisestä ja niiden lähtöpaikka-määräpaikkarakenteesta.

Puuttuvat matka-aikatiedot voivat johtaa esimerkiksi reittiohjausjärjestelmissä epäluotettaviin reittisuosituksiin. Park ym. (1998) ovat kuitenkin havainneet, että niiden linkkien, joilla ei ole anturiajoneuvoja, liikenneolosuhteet voidaan ennustaa lähilinkkien liikenneolosuhteiden perusteella. Tämä johtuu siitä, että peräkkäisten samansuuntaisten linkkien liikennevirrat korreloivat vahvasti keskenään. Kun koko liikenneverkko jaetaan vahvasti korreloiviin linkkiryhmiin, tarvittavien anturiajoneuvojen määrä voidaan määritellä siten, että kaikilla linkkiryhmillä on riittävä määrä anturiajoneuvoja halutulla todennäköisyydellä.

Parkin ym. (1998) menetelmä perustuu edellä mainitun lisäksi oletuksiin, että käytössä on huipputunnin liikennemäärätiedot kaikilta linkeiltä ja että kaikilla anturiajoneuvoilla on sama todennäköisyys tulla havaituiksi. Menetelmässä anturiajoneuvojen optimimäärä saadaan valitsemalla pienin N , joka toteuttaa alla olevan lausekkeen.

$$P\left[Z_j \geq \sqrt{N}\left(\frac{\alpha D_j}{N} - \hat{\pi}_j\right) \quad j = 1, \dots, k\right] \geq \beta$$

Lausekkeessa P tarkoittaa todennäköisyyttä, j indeksoi linkkiryhmiä, Z on normaalijakautunut vektori, josta saadaan kovarianssimatriisin elementit, D_j on linkkiryhmän j linkkien kokonaispituus, $\hat{\pi}$ on kunkin linkkiryhmän anturiajoneuvojen määrää kuvaavan satunnaisvektorin parametrivektori, sekä α ja β ovat parametreja, joihin päätöksentekijä voi vaikuttaa. Mitä suurempi α , sitä suurempi anturiajoneuvotiheys halutulla riskitasolla β . (Park ym. 1998.)

4 Tietojen tulkitseminen

4.1 Linkkidata

4.1.1 Taustaa

Liikennevirran laatua kuvataan usein liikennemäärän (q), liikennetiheyden (k) ja nopeuden (v) avulla. Liikennemäärän ja -tiheyden määritelmät ovat yksiselitteisiä, mutta nopeus vaatii lisäselvennyksiä ollakseen määritelty yksikäsitteisesti. Yleensä nopeudet jaetaan hetkellisiin pistenopeuksiin (v_{piste}) ja tielinkkiä koskeviin matkanopeuksiin (v_{matka}). Keskinopeudet määritellään

$$\bar{v}_{piste} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

$$\bar{v}_{matka} = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}$$

missä v_i on i :n ajoneuvon pistenopeus, n havaittujen ajoneuvojen lukumäärä, L linkin pituus ja t_i i :n ajoneuvon matka-aika. Kuten määritelmistä näkyy, pistenopeus perustuu hetkelliseen tilanteeseen, kun taas matkanopeus lasketaan sen ajan perusteella, joka ajoneuvoilta menee linkin ajamiseen. (Luku 4.1.1 perustuu viitteeseen Haugen (1996).)

Jos linkin nopeustaso on yhtenäinen, keskimääräiset pistenopeudet ovat keskimääräistä matkanopeutta korkeampia, jolleivät kaikki ajoneuvot aja samalla nopeudella. Tämä johtuu siitä, että keskimääräisessä matkanopeudessa hitaasti liikkuvia ajoneuvoja painotetaan enemmän kuin keskimääräisessä pistenopeudessa, koska painottavana tekijänä on matka-aika eikä nopeus.

Nämä kaksi nopeutta ovat samat silloin, kun kaikki ajoneuvot matkaavat samalla nopeudella, eli silloin kun nopeuksien varianssi (σ^2) on nolla. Wardrop kuvasi tämän matemaattisesti vuonna 1952:

$$\bar{v}_{piste} = \bar{v}_{matka} + \frac{\sigma_{matka}^2}{\bar{v}_{matka}}.$$

Highway Capacity Manual (HCM) 1994 esittää riippuvaisuuden perustamalla sen regressioanalyysiin:

$$\bar{v}_{matka} = 1,026 \cdot \bar{v}_{piste} - 3,042.$$

Liikennevirran perusyhtälössä ($q = kv$), jossa kuvataan liikennemäärän, liikennetiheyden ja nopeuden välistä riippuvaisuutta, nopeudella tarkoitetaan matkaja-kauman keskinopeutta. Käytännössä matkanopeus on kuitenkin usein korvattu pistenopeudella, jonka mittaaminen on huomattavasti helpompaa.

4.1.2 Pistedatan ja linkkidatan välinen vertailu

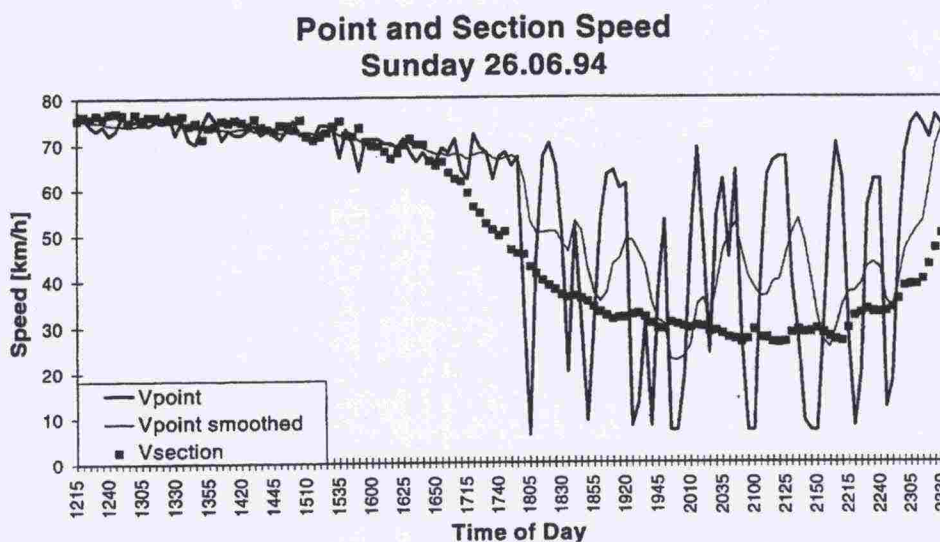
Pistedatan ja linkkidatan välisiä eroja selvitettiin Norjassa kahden koelinkin avulla. Linkeistä pidempi oli 33,24 km ja lyhyempi 281 m pitkä. (Luku 4.1.2 perustuu viitteeseen Haugen (1996).)

Pidemmän koelinkin pistedatan ja linkkidatan välisten erojen analyysi osoittaa, että matkanopeus on stabiilimpi parametri kuin pistenopeus ja sopii täten paremmin liikenteenohjauksen tarpeisiin. Sellaisilla aikajaksoilla, joilla liikenteessä tapahtui häiriötä, matkanopeuksissa on vähän vaihtelua ajoneuvojen välillä. Tästä syystä matkanopeus on hyödyllinen liikennevirran laadun indikaattori.

Pistenopeuksien ja linkin matkanopeuksien vaihtelua vertailtiin pidemmällä koelinkillä. Viiden minuutin keskimääräisen pistenopeuden lisäksi vertailussa käytettiin myös pistenopeuden 30 minuutin liukuvaa keskiarvoa. Pistenopeuksien mittauspiste sijaitsi noin puolivälissä matkanopeuden määrittäjäjaksoa.

Tavallisesti ruuhka ja viivytykset syntyvät pistenopeuksien mittauspisteeltä alavirtaan (eli koejakson loppupäässä). Liikenteen häiriöiden ensimmäiset merkit näkyvät siis koealueella matkanopeuden alentumisena. Matkanopeus laskee ja jonkin ajan kuluttua pistenopeudet alkavat heilahtella, mikä viittaa siihen, että epävakaata liikennevirtaa on saavuttanut pistenopeuksien mittauspiste.

Pistenopeuksien liukuvan keskiarvon alapuolella oleva matkanopeus viittaa liikennevirran häiriöihin koealueen loppupäässä. Tämä on myös varoitus siitä, että epävakaata liikennevirtaa saattaa saavuttaa pistenopeuksien mittauspiste. Kuva 5 näyttää tyypillisen tilanteen, jossa koealue on ruuhkainen ja epävakaata liikennevirtaa on ylittänyt pistenopeuksien mittauspiste.

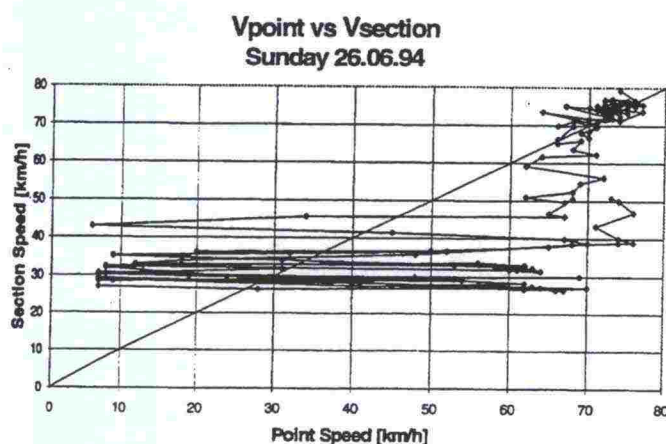


Kuva 5. Mitatut piste- (v_{point}) ja matkanopeudet ($v_{section}$) sekä pistenopeuksien 30 minuutin liukuva keskiarvo ($v_{point\ smoothed}$) pidemmällä koelinkillä (Haugen 1996).

Pitkillä linkeillä pistenopeuksien ja matkanopeuksien välinen suhde riippuu voimakkaasti mittauspisteiden sijainnista. Jos liikennevirta oletetaan vapaaksi, jois-

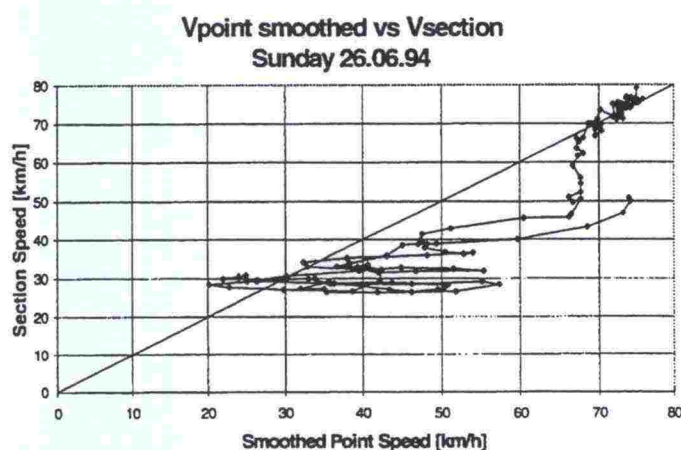
sain pisteissä pistenopeus on korkeampi kuin matkanopeus ja joissain alhaisempi.

Pistenopeuksien mittauspisteelle tyypillinen tilanne on esitetty kuvassa 6. Tilanne alkaa yläoikealta, jossa liikennemäärän kasvaessa matkanopeus laskee, kun taas pistenopeus pysyy välillä 60 - 70 km/h. Kun matkanopeus laskee välille 45 - 50 km/h, epästabiili liikennevirta saavuttaa pistenopeuksien mittauspisteen. Pistenopeudet oskiloivat voimakkaasti. Pahoina ruuhkapäivinä viiden minuutin keskipistenopeudet vaihtelevat välillä 5 - 70 km/h.



Kuva 6. Piste- ja matkanopeudet pidemmällä koelinkillä (Haugen 1996).

Kuvassa 7 on esitetty pistenopeuksien 30 minuutin liukuvat keskiarvot verrattuna matkanopeuksiin. Kuvasta näkyy selvästi matkanopeuksien varhainen aleneminen pistenopeuksiin verrattuna. Pistenopeuksien vaihteluväli on luonnollisesti pienempi kuin kuvassa 6. Kun varsinaiset pistenopeudet vaihtelevat pidemmällä koelinkillä välillä 5 - 70 km/h, liukuvan keskiarvon vaihteluväli on 20 - 60 km/h.



Kuva 7. Pistenopeuksien 30 minuutin liukuvat keskiarvot ja matkanopeudet pidemmällä koelinkillä (Haugen 1996).

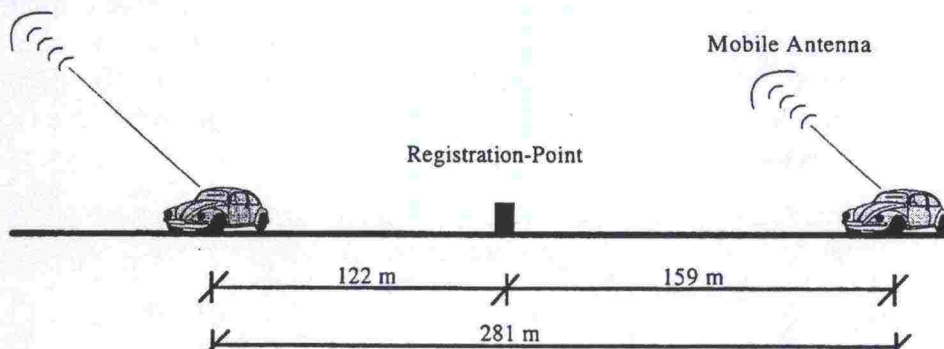
Kuvasta 7 nähdään myös, että pistenopeudet ovat alhaisempia ennen pistenopeuksien voimakasta laskua kuin tilanteen normalisoiduttua. Ennen laskua piste-

nopeuksien liukuva keskiarvo on 67 - 68 km/h ja tilanteen normalisoiduttua 75 - 77 km/h. Ero johtunee jälkeen-tilanteen pienemmästä liikennemäärästä.

Vakaan ja epävakaa virran välillä olevalla alueella pistenopeus liittyy korkeampaan matkanopeuteen, kun mennään vakaalta alueelta epävakaa, ja päin vastoin, kun mennään epävakaa alueelta vakaalle. Tämä voidaan selittää sillä, että tietyllä ajanjaksolla ne ajoneuvot, joilta pistenopeudet mitataan, ovat eri ajoneuvoja kuin ne, joita käytetään matkanopeuden määrittämiseen. Lisäksi sillä on oma vaikutuksensa, että liikenteen ongelmat liikkuvat alavirrasta ylävirtaan (eli koejakson loppupäästä kohti alkuosaa). Kun liikenteen häiriöitä ilmenee, ne ajoneuvot, jotka ovat tietyllä aikajaksolla mukana linkkiparametrien määrittämisessä, ovat saavuttaneet pistenopeuksien mittauspisteestä alavirtaan (eli mittauspisteen jälkeen sijaitsevan) olevan jonon. Vastaavasti kun ruuhka on purkautumassa, linkkiparametrien laskemiseen käytetyt ajoneuvot kuuluvat pistenopeuksien mittauspisteestä ylävirtaan olevaan (eli ennen mittauspistettä sijaitsevaan) jonoon. Nämä molemmat tilanteen näkyvät tietenkin alhaisempaa matkanopeutena.

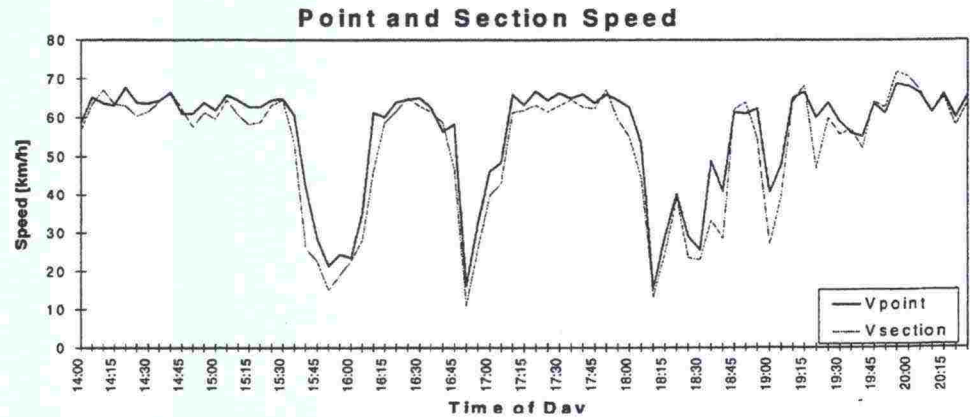
Lyhyempi koelinkki alkoi kiinteästä antenniasemasta ja päättyi liikuteltavaan antenniasemaan. Pistedatan mittauspiste oli koejakson keskivaiheilla. Koealue on esitelty kuvassa 8. Alueella on 80 km/h nopeusrajoitus. Kun liikennevirta oli vakaa, nopeudet vaihtelivat välillä 60 - 70 km/h. Lähes kaikkien mittausjaksojen aikana ollut rankkasade, joka alensi näkyvyyttä aika ajoin huomattavasti, oli varmasti syynä siihen, että nopeudet olivat nopeusrajoitusta alempia.

Stationary Antenna



Kuva 8. Piste- ja matkanopeuksien vertailun lyhyempi koelinkki (Haugen 1996).

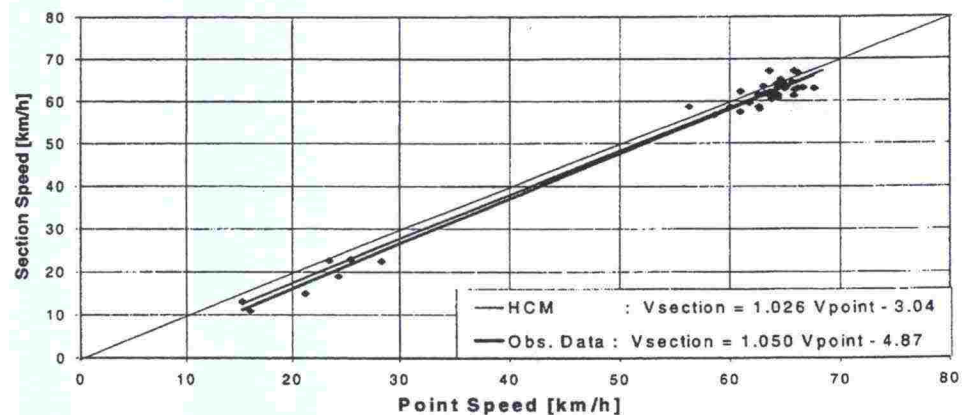
Piste- ja linkkidata, joka rekisteröitiin lyhyemmällä koelinkillä viiden minuutin jaksoissa, on riippuvainen toisistaan HCM:n kuvaamalla tavalla. Nopeuksien vaihtelut mittausjakson aikana on esitetty kuvassa 9. Nopeuksien välillä ei ole lyhyellä koejaksolla kovarianssia. Lisäksi liikennevirtateorian mukaisesti voidaan havaita, että havaitut pistenopeudet ovat pääosin korkeampia kuin matkanopeudet.



Kuva 9. Piste- ja matkanopeuksien muutokset lyhyemmällä koelinkillä (Haugen 1996).

Kuvassa näkyy useampi liikenteen häiriökohta. Ajanjaksoina 15:30 - 16:15 ja 16:45 - 17:10 on selvää, että liikennevirta on siirtynyt vakaalta alueelta epävakaa-kaalle ja takaisin. Myös kello 18 liikennevirta siirtyy vakaalta alueelta epävakaa-kaalle. Tämän jälkeen on useita epäselvempiä häiriötilanteita.

Kuvassa 10 esitetyt nopeudet ovat tilanteista, joissa liikennevirta on ollut joko vakaa tai epävakaa. Siirtymäalueelta oleva data jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska nopeudet vaihtelevat tällöin huomattavasti koealueen sisällä. Nopeuden vaihtelu on pieni myös HCM:n nopeushavainnoissa.



Kuva 10. Lyhyemmällä koelinkillä havaittujen piste- ja pistenopeuksien sekä HCM:n arvojen vertailu. Nopeudet on laskettu jaksoista, joiden aikana nopeus oli vakaa koko koejaksolla (Haugen 1996).

4.1.3 Linkkiparametrien estimointi anturiajoneuvojen avulla

Liikennetiheyden ja -määrän määritelmät osoittavat, että liikennetiheys on riippuvainen tielinkin liikennemäärästä ja matka-ajasta tietyn aikajakson aikana. Oletetaan, että liikenneinformaatiojärjestelmällä on käytössään ainoastaan anturiajoneuvotiedot. Ongelmana on se, että jollain tietyllä hetkellä ja tietyllä linkillä olevien anturiajoneuvojen määrä ei vastaa verkon keskimääräistä penetraatioastet-

ta ja vaikka linkin penetraatioaste oletettaisiin vakioksi, siinä on niin paljon vaihtelua hetkestä toiseen, ettei anturiajoneuvojen määrän perusteella voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä linkin liikennetiheydestä. (Luku 4.1.3 perustuu viitteeseen Westerman (1995).)

Oletetaan tietyllä tielinkillä olevien ajoneuvojen määrä Poisson-jakautuneeksi, jolloin myös linkin anturiajoneuvojen määrä on Poisson-jakautunut. Anturiajoneuvojen tiheys voidaan siis estimoida jakauman perusteella, kun jakauman odotusarvon estimaattina käytetään havaittua anturiajoneuvojen määrää ja myös hajonnan oletetaan olevan riippuvainen tästä Poisson-oletuksen mukaisesti. Kaikkien ajoneuvojen liikennetiheys saadaan laskettua anturiajoneuvojen tiheydestä penetraatioasteen avulla. Liikennemäärä saadaan estimoitua vastaavasti.

Tulokset osoittavat, että parametrit voidaan estimoida vain tietyllä tarkkuudella. Korkeallakin penetraatioasteella estimaatteihin jää epätarkkuutta. Tämä vahvistaa sen, että liikennemäärä ja -tiheys ovat sellaisia suureita, joiden määrittämiseksi pitää käytännössä mitata kaikki virran ajoneuvot. Anturiajoneuvot eivät siis ole hyvä menetelmä näiden parametrien määrittämiseen, koska otos jää liian pieneksi. Epätarkkuudesta huolimatta anturiajoneuvoja voidaan kuitenkin käyttää sen tiedon arvioimiseen, onko liikennetilanne "hiljainen", "ei niin hiljainen" vai "vilkas". Anturiajoneuvot sopivat myös pidemmän aikavälin sovelluksiin, kuten liikennemääräkarttojen tekemiseen.

Oletetaan, että jokainen anturiajoneuvo lähettää sijaintikoodinsa, poikkileikkaukset, joissa liikenneolosuhteet muuttuivat merkittävästi, ja edellisestä pisteestä lasketun matka-ajan, yhdessä ennalta määrättyjen kiintopisteiden sijaintikoodien ja viestin lähetyshetken sijaintikoodin kanssa ja että viestiin liitetään lisäksi absoluuttinen ajanhetki, jolloin anturiajoneuvo aloitti tähän kyseiseen liikenneviestiin liitettyjen liikenneolosuhteiden rekisteröinnin. Kun nyt yhdistetään kaikki tietyllä hetkellä eri anturiajoneuvoilta tulleet liikenneviestit, tielinkki saadaan jaettua tiejaksoihin, joilla anturiajoneuvojen nopeudet eivät vaihtelee merkittävästi. Jotta tiejaksojen lukumäärä ei kasvaisi liian suureksi, määritellään tiejakson minimipituudeksi esimerkiksi 100 metriä.

Koska jokaisen anturiajoneuvon nopeus on nyt jokaisella tiejaksolla määritelmän mukaan vakio ja koska jokaisen tiejakson tarkka pituus on tunnettu, saadaan määritettyä linkin keskimääräinen matkanopeus ja -aika. Tämä mahdollistaa sen, että on mahdollista estimoida suoraan linkin matkanopeus matka-ajan sijaan. Lopullinen linkin matkanopeus ja -aika lasketaan siis sellaisten tiejaksojen perusteella, joilla kaikkien anturiajoneuvojen nopeudet ovat paloittain vakioita.

Liikenneinformaatiojärjestelmät tarvitsevat reaaliaikaisen katsauksen sekä tilaan että aikaan liittyvistä vaihteluista. Teoriassa nämä tiedot voitaisiin saada jatkuvilla ilmakuvauksilla tai asentamalla kiinteitä ilmaisimia perä perään koko verkolle. Kumpikin vaihtoehto on kuitenkin kaukana realistisesta. Onneksi anturiajoneuvokonsepti täyttää liikenneinformaatiojärjestelmien molemmat vaatimukset. Tästä syystä tielinkin keskinopeus saadaan laskemalla kaikkien linkillä olevien anturiajoneuvojen matkanopeuksien keskiarvo linkin pituudella ja mittausajalla painotettuna. Linkin keskimatka-aika määritellään siis aikana, joka linkin ajamiseen linkin keskimatkanopeudella menee. Tielinkin keskinopeutta voidaan siis pitää eräänlaisena aika- ja tilakeskinopeuden yhdistelmänä. Jos tielinkin keskinopeu-

den laskee anturiajoneuvojen avulla erittäin lyhyelle aikajaksolle, tuloksena on tilakeskinopeus ja vastaavasti aikakeskinopeus saadaan, jos tielinkin keskinopeus lasketaan erittäin lyhyelle tiejaksolle.

Kun tielinkki koostuu suuresta määrästä tiejaksoja, tielinkkikohtaisissa arvoissa on paljon jaksokohtaisia epätarkkuuksia. Jokainen tiejakso on kuitenkin suhteellisen lyhyt, jolloin tiejaksokohtainen epätarkkuuskin on pientä. Jos linkki koostuu vain muutamasta pitkästä tiejaksosta, epätarkkuuksiakin on vain muutamia, mutta ne ovat suuruusluokaltaan huomattavasti suurempia. Epätarkkuuden suuruuden voidaan siis katsoa olevan tiejaksojen lukumäärästä riippumaton, kun taas tielinkin keskinopeuden sekä todellinen että estimoitu keskihajonta ovat riippuvaisia tiejakson pituudesta.

Yksinkertaisin ja suoraviivaisin lähestymistapa tielinkin keskinopeuden estimointiin anturiajoneuvojen liikenneraporteista kootun nopeusotoksen perusteella on ottaa nopeuksista keskiarvo. Linkkiparametrien estimointi yksinkertaisen keskiarvoestimaatin avulla on kuitenkin arveluttavaa etenkin silloin, kun otoskoko on pieni. Tielinkin keskinopeuden ja -matka-ajan estimointiseksi määritellään liikennevirtamalli, joka kuvaa yksittäisten anturiajoneuvojen nopeuksien ja liikennevirran todellisen keskinopeuden välistä yhteyttä. Malli perustuu liikennevirran peruskuvaajaan (*qv*-kuvaaja). Kuvaajasta voidaan erottaa kolme aluetta: vapaan virran alue, epävakaa alue ja ruuhka-alue. Koska epävakaa alue voidaan tulkita siirtymävaiheeksi kahden muun alueen välillä, liikennevirtamalliin on määriteltävä vain kaksi aluetta, joista molemmat pitävät sisällään osan epävakaasta alueesta.

Yksittäisen anturiajoneuvon nopeuden kuvitellaan olevan satunnainen muuttuja, joka noudattaa jakaumaa, jonka odotusarvo on linkin keskinopeus. Tämä jakauma voidaan määrittää keräämällä suuri määrä liikennedatata ja perustamalla tästä tietokanta. Oletus yksittäisten anturiajoneuvojen nopeuksien riippumattomuudesta pitää paikkansa alhaisilla penetraatioasteilla. Kun penetraatioaste kasvaa, vähenee nopeuksien välinen riippumattomuus, mutta tällöin nopeushavaintoja saadaan jo niin paljon, että matkanopeus voidaan arvioida luotettavasti havaintojen pohjalta.

Nopeusjakauman varianssi riippuu nopeuden sijainnista peruskuvaajalla (*qv*-kuvaajalla). Tielinkin todellinen keskinopeus vaihtelee aikaisempaan dataan perustuvan keskinopeuden odotusarvon ympärillä. Vapaalla ja ruuhkaisella liikenteellä on tässäkin omat jakaumansa. Jakaumien odotusarvot ja varianssit olisi parasta määrittää erikseen eri kuukausille, viikonpäiville, samanlaisille sää- ja keliolosuhteille jne. Tällä tapaa jakaumista saadaan tarkempia.

Toinen tapa parantaa liikennevirtamallin avulla saatavia estimaatteja on verrata tielinkin keskinopeutta aikaisempien tietojen lisäksi edellisten mittaustulosten mukaisiin nopeuksiin. Tämä tekee jäykät aikaisempiin tietoihin perustuvat arvot joustavammiksi ja ne sopeutuvat paremmin kulloiseenkin tilanteeseen. Myös erilaisia tasoituskeinoja (kuten eksponentiaalista tasoitusta) voidaan käyttää.

Vapaan virran alueella nopeuden jakauma oletetaan normaaliksi odotusarvona tietokannan havaintojen keskinopeus. Tällä oletuksella yksittäisten anturiajoneuvojen nopeuksien summa ja vastaanotettujen liikenneviestien määrä antavat riittävät pohjatiedot tielinkin keskinopeuden estimointiin. Ruuhka-alueella yksittäisten anturiajoneuvojen nopeuksien on arvioitu noudattavan gamma-jakaumaa.

Myös tällä epäsymmetrisellä jakaumalla keskinopeuden estimaatti saadaan tietokannan havaintojen keskinopeudesta.

Estimaattien vakautta voidaan parantaa sekä vapaan että ruuhkaisen liikennevirran alueella käyttämällä tasoitusta. On selvää, että vapaan virran alueella yksittäisten anturijoneuvojen nopeushavaintojen merkitys kasvaa otoskoon kasvaessa ja tietokannan vastaavasti laskee. Sama pätee myös ruuhkaisella alueella.

Kaikissa olosuhteissa tilastollinen estimaatti, joka ottaa huomioon tietokantaan tallennetut tiedot muuttujan käyttäytymisestä, on vähintään yhtä hyvä kuin estimaatti, joka ei ota näitä huomioon olettaen, että tietokannan tiedot ovat luotettavia. Suoran keskiarvoestimaatin etuna on se, että estimointiproseduuri on äärimmäisen yksinkertainen, kun taas tietokannan tietojen mukaan tuominen mutkistaa asioita.

Molemmat estimaatit ovat harhattomia. Suoran keskiarvoestimaatin keskineliövirhe on suurempi kuin tietokannan tiedot huomioon ottavan estimaatin. Tietokannan tietojen mukaan ottaminen on siis vaivansa arvoista, koska tielinkin keskinopeuden estimaatti tarkentuu ja sen luotettavuus paranee. Jo pienellä otoskolla on siis parempi käyttää tietokantaa hyväksi käyttävää estimaattia kuin suoraan keskiarvoon perustuvaa estimaattia, koska se on jälkimmäistä estimaattia tarkempi ja luotettavampi kaikissa olosuhteissa. Suurilla anturijoneuvomäärillä molemmat estimaatit ovat yhtä hyviä. Tietokantaa hyväksi käyttävää estimaattia kannattaa kuitenkin käyttää vain silloin, kun sen sisältämien tietojen voidaan olettaa olevan oikeita.

4.1.4 Matka-ajan määrittäminen induktioilmaisimien avulla

Matka-aika voidaan määrittää induktioilmaisindatasta vähintään neljällä eri tavalla. Menetelmistä ensimmäinen perustuu kahteen mittauspisteeseen, toinen kumulatiivisiin jakaumiin, kolmas liikennemäärien väliseen korrelaatioon ja neljäs ajoneuvojen "sormenjälkien" tunnistamiseen.

1) Kahden mittauspisteen liikennevirrat

Vapaassa liikennevirrassa keskimääräinen matka-aika voidaan arvioida karkeasti tietyn mittaisella tiejaksolla sen alkupisteen ja loppupisteen ajoneuvojen nopeuksien perusteella sillä oletuksella, että ajoneuvot ajavat tiejakson alussa mitattua nopeutta jakson puoliväliin ja muuttavat siellä nopeutensa tiejakson lopussa mitatuksi nopeudeksi. Menetelmä antaa riittävän tarkan tuloksen myös ruuhkaliikenteessä, kunhan tiejakso on riittävän lyhyt (≤ 1 km) ja aggregointiaika ei ylitä 2 minuuttia. (Westerman 1995.)

Parempi menetelmä on käyttää liikennemäärän ja nopeuden osamäärää, jolloin saadaan määriteltyä paikallinen liikennetiheys. Liikenteen oletetaan olevaan vapaata ja mitattujen parametrien ajatellaan edustavan koko tiejaksoa. Tiejakson alusta ja lopusta määriteltyjen liikennetiheyksien keskiarvo kerrotaan tiejakson pituudella, jolloin saadaan tulokseksi tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrä. Saatua ajoneuvojen määrää päivitetään laskemalla liikennemäärien erotus aggregointiajan kuluttua, kertomalla erotus aggregointiajalla ja lisäämällä tuloon aiemmin saatu ajoneuvojen määrä. Nyt matka-ajaksi saadaan päivitetty ajoneuvo-

määrä (ajon.) jaettuna jälkimmäisellä liikennemäärällä (ajon./h). (Westerman 1995.)

Molemmat menetelmät sopivat pienen mittakaavan mittauksiin. Kun tiejakson pituus ei ylitä 500 metriä, menetelmä toimii hyvin. Ensimmäinen menetelmä antaa hieman parempia tuloksia kuin jälkimmäinen, joka on alttiimpi mittausvirheille. Kilometrin pituisella tiejaksolla tulokset ovat vielä tyydyttäviä, mutta tulosten laatu heikkenee nopeasti tiejakson pituuden kasvaessa. Kun tiejakson pituus on 5 - 10 km, molemmat menetelmät ovat huonoja. (Westerman 1995.)

2) Kumulatiiviset jakaumat

Matka-aika saadaan määriteltä vertailemalla peräkkäisten mittauspisteiden kumulatiivisia ajoneuvojen saapumisista tehtyjä jakaumia toisiinsa ja määrittämällä aika, jolla jakaumat ovat mittauspisteiden välillä siirtyneet. Vertailu voidaan tehdä myös ajoneuvoluokittain, mikä parantaa menetelmän tarkkuutta erityisesti silloin, kun eri ajoneuvoluokat ajavat hyvin erilaisilla nopeuksilla. Menetelmän huono puoli on se, että jos tietty määrä ajoneuvoja jää havaitsematta molemmissa mittauspisteissä tai ne tulkitaan väärin, matka-aika-arvio on virheellinen. (Westerman 1995, Cassidy & Windover 1995.)

3) Liikennemäärien välinen korrelaatio

Menetelmä perustuu oletukseen, että liikenne on jatkuva virtausprosessi ja että tietyssä paikassa mitattu liikennemäärä voidaan mitata uudestaan toisessa paikassa alavirran suuntaan. Liikennemäärä mitataan kahdessa paikassa induktioilmaisimilla ja saatuja signaaleja verrataan keskenään. Kahden täsmäävän liikennemäärän välinen aikaviive on sama kuin keskimääräinen matka-aika. Menetelmä sopii ainoastaan vapaalle liikennevirralle, koska ruuhkassa korrelaatio häviää. (Westerman 1995.)

Liikennemäärien väliseen korrelaatioon perustuvasta menetelmästä on kehitetty parannettu kaksivaiheinen menetelmä. Ensimmäinen vaihe on määrittää edellä kuvatulla tavalla liikennemäärien välinen korrelaatio ja käyttää tätä ruuhkan ilmaisemiseen. Jos korrelaatio löytyy, liikennettä voidaan pitää suhteellisen vapaana, kun taas korreloimattomuus on merkki ruuhkasta. Jos ruuhkaa löytyy, käynnistetään menetelmän toinen vaihe, deterministinen jonomalli, jossa määritellään sen hetkinen ajoneuvomäärä, "liikaa" olevien ajoneuvojen määrä ja tiejaksolle arvioitu viivytys. Viimeksi mainittu tehdään suhteuttamalla ajoneuvojen ylijäämä tiejaksolta poistuvien ajoneuvojen määrään. (Westerman 1995.)

4) "Sormenjäljet"

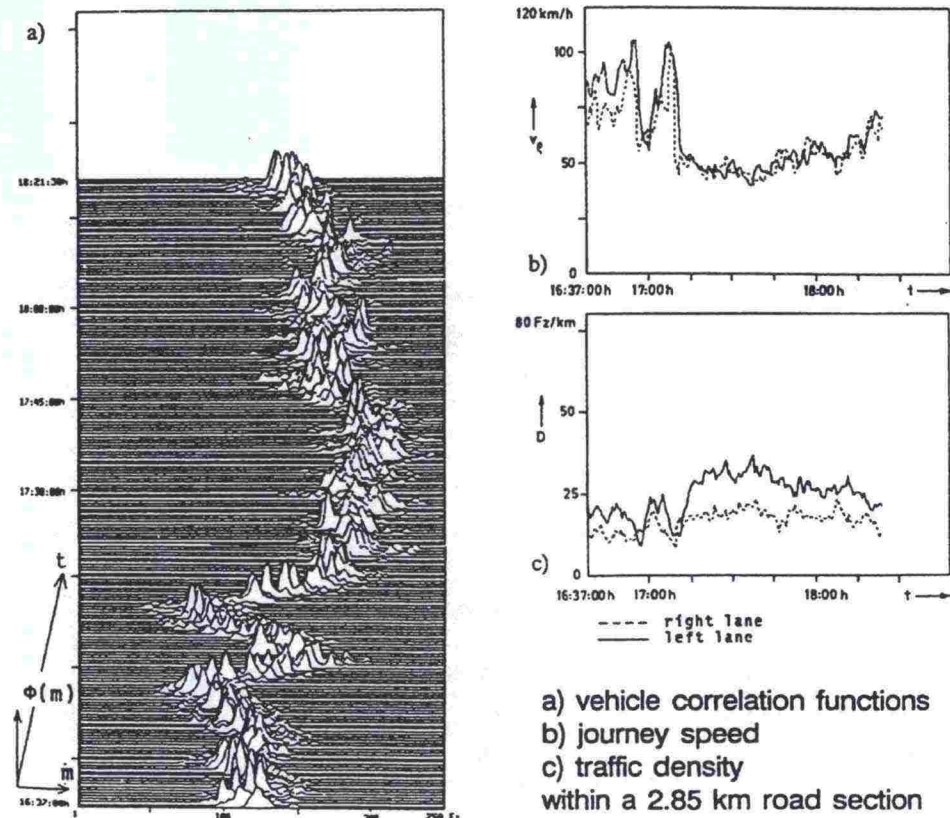
Liikenteestä voidaan määrittää linkkikohtaisia tietoja korrelaation avulla käyttämällä hyväksi ajoneuvojen "sormenjälkiä" eli niiden aiheuttamia yksilöllisiä pulsseja induktioilmaisimen jännitteen muutoksissa. Yksittäisten ajoneuvojen sormenjäljet ovat hyvin samantapaisia muiden vastaavanlaisten ajoneuvojen sormenjälkien kanssa, mutta erot eri ajoneuvotyyppien välillä ovat sen verran merkittäviä, että ajoneuvoryhmät voidaan tunnistaa linkin lopussa ja linkkikohtaiset suureet määrittää. Tällä tavalla suhteellisen pienellä mittauspistemäärällä saadaan sama tieto liikenteestä, joka perinteisellä pistedataan perustuvalla menetelmällä olisi vaatinut huomattavaa mittauspistetiheyttä. (Pfannerstill 1991.)

Ajoneuvon sormenjälki määritetään induktioilmaisimen avulla, sillä ilmaisinsilmukan impedanssi muuttuu, kun ajoneuvo ylittää sen. Ilmaisim muuttaa nämä muutokset kyseiselle ajoneuvolle tyypilliseksi jännitesignaaliksi (*kuva 2*). Ilmaisimen jännitesignaalit normeerataan, jotta päästään eroon signaalien ajoneuvon ominaisuuksiin liittymättömistä ominaispiirteistä (mm. nopeuden ja ilmaisim herkkyyden vaikutuksista). Tällaisten normeerattujen, digitaalisten ajoneuvojen sormenjälkiotoksia käsitellään sormenjälkivektorin komponentteina. (Pfannerstill 1991.)

Ajoneuvolle ominaisten piirteiden erottamiseen sormenjälkivektorista käytetään tiedontiivistämismenetelmiä. Nämä tiivistetyt piirteet tallennetaan uuteen vektoriin. Linkin alku- ja loppupisteestä määritellyjä vektoreita verrataan toisiinsa ja ajoneuvot tulkitaan samoiksi, kun vektorit ovat riittävässä määrin yhteneviä. Lasketaan tietyn mittaisesta jonosta "identtisten" ajoneuvojen lukumäärä. Tämä johtaa korrelaatiofunktioon, jota tasoitetaan suodatinfunktiolla, jotta voidaan rajoittaa jonossa tapahtuneiden muutosten kuten ohitusten ja havainnointivirheiden aiheuttamat vaikutukset. Näin saadaan lopulta tasoitettu korrelaatiofunktio. (Pfannerstill 1991.)

Poimitaan tietyllä ajanhetkellä tietyn mittainen ajoneuvojono tielinkin alun ajoneuvojen sarjasta ja näille ajoneuvoille lasketaan korrelaatiofunktio vertailemalla ajoneuvoja linkin loppupisteen datan kanssa. Tämä tehdään toistuvasti tietyn ajan välein, jolloin korrelaatiofunktioon saadaan aikajatkuvuus (*kuva 11*, vasemmalla). Korrelaatiofunktion maksimi viittaa jonon "uudelleen tunnistamiseen". Kun tunnetaan "uudelleentunnistamishetki", voidaan laskea jonon keskimääräinen matka-aika linkille. Todellinen liikennetiheys voidaan laskea niiden ajoneuvojen lukumäärän avulla, jotka ovat menneet linkille juuri tunnistetun jonon jälkeen. Data voidaan määritellä erikseen eri ajoneuvotyypeille tai kaistoittain. Tämä johtaa erittäin tarkkaan kuvaan liikennetilanteesta. (Pfannerstill 1991.)

Kuvassa 11 on esimerkki ajoneuvojen korrelaatiofunktioista sekä saaduista matka-ajoista ja liikennetiheyksistä, jotka on mitattu 2,85 km pituisella jaksolla moottoritiltä A4 Kölnin ja Aachenin välillä eräänä perjantai-iltapäivänä. (Pfannerstill 1991.)



Kuva 11. Esimerkki sormenjälkimenetelmällä saatavista linkkikohtaisista suureista moottoritieltä A4 Köln-Aachen perjantai-iltapäivältä: vasemmalla ajoneuvojen korrelaatiofunktio, oikealla yläkuvassa matkanopeuksia ja oikealla alakuvassa liikennetiheydet (Pfannerstill 1991).

MAVE-järjestelmä (Modular System for Traffic Data Aquisition) toimii edellä esitetyn tekniikan mukaisesti ja sitä käytetään monilla moottoritieosuuksilla Saksassa ja muualla. (Pfannerstill 1991.)

4.2 Häiriöiden havaitseminen

4.2.1 Yleistä

Automaattinen häiriöiden havaitseminen on tärkeä osa liikenteenhallintaa. Se on erityisen tärkeää tunneleissa ja muissa riskipaikoissa. Tarvittavan häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän luonne on riippuvainen häiriön määritelmästä ja liikenteen määrästä. (Bell 1994.)

Häiriöiden havaitseminen jaetaan neljään vaiheeseen: häiriön havaitsemiseen, siihen reagoimiseen, sen poistamiseen siihen liittyvine liikenteen hallinnan toimenpiteineen ja liikenteen normaalisti palautumiseen. Aika, joka häiriöstä selviytymiseen menee, riippuu siitä, kuinka nopeasti kustakin vaiheesta selvitään. (Lee & Hwang 1998.)

4.2.2 Perinteiset menetelmät

Perinteiset häiriöidenhavaitsemismenetelmät etsivät häiriöitä tarkastelemalla muutoksia liikennevirtaan liittyvissä parametreissa, kuten liikennemäärässä, varausasteessa, liikennetiheydessä, nopeudessa ja matka-ajassa. Perinteisissä menetelmissä ilmaisimena on yleensä induktioilmaisimien. Nämä induktioilmaisimiin perustuvat menetelmät voidaan jakaa viiteen ryhmään: vertaileviin, tilastollisiin, aikasarjoihin perustuviin, tasoittaviin / suodattaviin ja liikennemalleihin perustuviin algoritmeihin. Lista perinteisistä häiriöidenhavaitsemisalgoritmeista on esitetty taulukossa 4. (Wang & Sisiopiku 1998, Lee & Hwang 1998.)

Taulukko 4. Perinteisiä häiriöidenhavaitsemisalgoritmeja (Wang & Sisiopiku 1998).

Luokka	Algoritmi
Vertailevat algoritmit	<ul style="list-style-type: none"> • Hahmontunnistus (PATREC) • Perus-Kalifornia • Sovellettu Kalifornia • All Purpose Incident Detection (APID)
Tilastolliset algoritmit	<ul style="list-style-type: none"> • Keskihajonta • Bayesiläinen
Aikasarjoihin perustuvat algoritmit	<ul style="list-style-type: none"> • ARIMA • Korkea varausaste
Tasoittavat / suodattavat algoritmit	<ul style="list-style-type: none"> • Eksponentiaalinen tasoittaminen • Alipäästösuodatin
Liikennemalleihin perustuvat algoritmit	<ul style="list-style-type: none"> • Dynaaminen malli • McMaster

Hahmontunnistamisalgoritmien perustana on se, että liikenne käyttäytyy häiriötilanteissa eri tavalla kuin normaaleissa olosuhteissa. Kalifornia-algoritmi perustuu oletukseen, että häiriötilanteessa ylävirran ilmaisimen varausaste kasvaa samalla, kun alavirran ilmaisimen laskee. Järjestelmä päättää häiriön olemassaolon vertaamalla liikennemäärää, varausastetta tai nopeutta ennalta määrättyihin kynnysarvoihin. Algoritmi on rakenteeltaan päätöspuu ja siitä on useita sovelluksia. Toinen yksinkertainen mutta tehokas tämän tyyppinen algoritmi on Transportation Research Laboratoryn (TRL) kehittämä HIOCC, joka tunnistaa epätavallisen korkeat varausasteet raja-arvojen avulla. Eri mittausasemien välillä ei ole tiedonvaihtoa. HIOCC:a on käytetty DRIVE:n MONICA-projektissa. Vertailevan algoritmin etuna on sen yksikertaisuus ja se, ettei ole tarvetta monimutkaisiin kalibrointiin eikä liikennedatalla tarvitse muokata. Haittana taas on, ettei menetelmä sovi dynaamiseen liikenneolosuhteiden tunnistamiseen, väärien hälytysten aste on korkea ja kiinteät kynnysarvot ovat joustamattomia. (Bell 1994, Wang & Sisiopiku 1998, Pursula 1988.)

Tilastolliset algoritmit vertaavat mitattuja parametriarvoja estimoituihin arvoihin ja määrittävät, ovatko arvot estimoitujen arvojen luottamusvälin ulkopuolella. Luottamusväli määritellään häiriöttömästä liikennedatasta. Keskihajonta-algoritmi pe-

rustuu oletukseen, että nopea muutos mitatussa muuttujassa viittaa häiriön olemassaoloon. Algoritmillä on korkea havaitsemis- ja väärin hälytysten aste, mutta nopea havaitsemisaika. Bayesiläinen algoritmi laskee häiriön todennäköisyyttä aikaisemman datan perusteella. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Aikasarja-algoritmit perustuvat liikenneolosuhteiden ennustettavuuteen. Algoritmi ennustaa lähitulevaisuuden liikennettä aikaisemman datan perusteella. Häiriön tulkitaan tapahtuneen, kun ennustettu arvo eroaa enemmän kuin ennalta määritetyn arvon verran mitatusta. Tämän algoritmityypin edustaja on ARIMA-algoritmi. Toinen aikasarja-algoritmi on korkea varausaste -algoritmi, joka havaitsee paikallaan olevat tai hitaasti liikkuvat ajoneuvot yksittäisten ilmaisimien varausasteen perusteella (Wang & Sisiopiku 1998, Pursula 1988). Aikasarja-algoritmien etuna on, että ne voivat ottaa huomioon vaihtelut mittauksissa myös häiriöissä olosuhteissa (Bell 1994).

Väärin hälytysten välttämiseksi useimmat häiriöidenhavaitsemisjärjestelmät toimivat siten, että algoritmin pitää viitata häiriöön tietyn ajan verran ennen kuin järjestelmä antaa hälytyksen. Menetelmä kuitenkin pidentää häiriön havaitsemisaikaa. Tasoittamiseen tai suodattamiseen perustuvissa algoritmeissa ei ole tätä ongelmaa (Wang & Sisiopiku 1998). Häiriöiden havaitsemisessa on käytetty Kalman-suodatustekniikoita, joita on sovellettu makroskooppisiin liikennevirtaparametreihin (liikennemäärä, liikennetiheys ja keskinopeus) (Bell 1994, Holma 1991, Pursula 1988). Suodattamiseen perustuvia tekniikoita käytetään usein yhdessä muiden tekniikoiden kanssa (Lee & Hwang 1998).

Liikennemallimenetelmät havaitsevat häiriöitä erilaisten liikennevirtateoriaan perustuvien suureiden avulla, jotka kuvaavat liikennettä häiriötilanteessa. Tällaiset mallit kuvaavat liikenteen dynaamisuutta liikennevirran peruskuvaajien avulla. Algoritmit olettavat, että häiriön aiheuttamat muutokset liikennevirrassa noudattavat ennalta tunnettua mallia. Malli käyttää kahta erilaista hypoteesien testaustekniikkaa: monimalli- (Papageorgiou 1983) ja yleistettyä uskottavuusosamääräalgoritmia. Kun maksimi uskottavuusosamäärä ylittää ennalta määrätyn raja-arvon, häiriön olemassaolo vahvistetaan. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Perinteiset häiriöidenhavaitsemisalgoritmit toimivat silloin, kun liikennettä on kohdallisesti tai paljon. Kokemus on osoittanut, että induktioilmaisimilla mitattavista parametreista (varausaste, liikennemäärä ja nopeus) nopeus on ainoa, joka kykenee erottamaan häiriöt riittävän hyvin. Pienillä liikennemäärillä yhdistelmäparametrit (varausaste, liikennemäärä tai nopeus aikayksikköä kohti) eivät ole käytökelpoisia. Täysin yhdistelemättömien parametrien (aika, jolloin ajoneuvo ohittaa ilmaisimen) käytöstä on tehty kokeita ajoneuvoja laskemalla, jolloin ajoneuvot on havainnoitu tutkittavalle tiejaksolle tullessa ja sieltä poistuttaessa. Tavoitteena on löytää ajoneuvot, jotka havaitaan tiejakson alkupisteessä, mutta jotka eivät poistu tiejaksolta tietyn aikajakson aikana. Tämän tyyppiset algoritmit ovat erityisen riippuvaisia ilmaisimien toiminnan luotettavuudesta. (Bell 1994.)

Pistemittauksiin perustuvissa häiriöidenhavaitsemismenetelmissä on puutteita, joita ei voida voittaa parantelemalla algoritmeja. Häiriötä ei havaita ennen kuin sen aiheuttamat vaikutukset voidaan mitata ilmaisimella. Tämä yleensä pidentää havaitsemisaikaa ja kasvattaa sekundaärihäiriöiden tapahtumisriskiä ennen kuin

mitään voidaan tehdä. Tästä syystä aluehavainnointi kiinnostaa (Bell 1994). Alla on esitetty yhteenveto perinteisistä häiriöidenhavaitsemisalgoritmeista.

Datavaatimukset: Suurin osa algoritmeista, jotka käyttävät kiinteitä kynnysarvoja, vaativat aikaisempaa dataa erilaisille olosuhteille ja ympäristöille, kuten tiegeometrialle, keliolosuhteille ja liikennemäärille. Laskenta on suuritöistä, mikä voi pidentää häiriön havaitsemisaikaa. Lisäksi ei ole taattua, että aina on olemassa sopivaa dataa. Puuttuva data saattaa johtaa suureen väärin hälytysten määrään.

Siirrettävyys: Vaikka moni algoritmi toimii hyvin joissain tietyissä olosuhteissa, ne toimivat usein huonosti, jos olosuhteet muuttuvat. Tämä johtuu ennalta asetetuista kiinteistä raja-arvoista, jotka on saatu aikaisemmasta datasta joihinkin tiettyihin liikenneolosuhteisiin tietynlaisella tiellä eivätkä ole välttämättä yleistettävissä.

Reaaliaikaisuus: Ennalta asetetut raja-arvot ovat ongelma algoritmeille, jotka toimivat hyvin dynaamisissa liikenneolosuhteissa. Jotkut järjestelmät käyttävät eri raja-arvoja eri aikoina ja erilaisissa olosuhteissa. Suodatin- ja dynaamiset mallit käyttävät joustavia kynnysarvoja ja parametrejä. Laskentatehokkuus on olennaista reaaliaikasovelluksissa.

Havaitsemiskyky: Perinteisillä algoritmeilla on rajoituksensa sellaisten häiriöiden havaitsemisessa, jotka eivät välttämättä aiheuta selvää välityskyvyn laskua, kuten pientareelle pysähtynyt auto, eivätkä ne osaa määritellä häiriön vakavuutta, tukittujen kaistojen määrää eivätkä häiriön ennakoitua kestoa. Häiriön sijainnin tunnistaminen riippuu ilmaisien sijainnista ja määrästä.

Toiminta: Perinteisillä algoritmeilla häiriöiden havaitsemisaste vaihtelee 67 ja 100 prosentin välillä ja väärin hälytysten aste 0 ja 2 prosentin välillä. Häiriön havaitsemiseen algoritmeilla menee puolesta neljään minuuttia. (Wang & Sisiopiku 1998.)

4.2.3 Uudet menetelmät

Häiriöiden havaitsemiseen on tullut myös monia uusia menetelmiä. Näitä ovat mm. videokuvan analysointi, tekoälysovellukset sekä anturiajoneuvot. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Maailmalla on parhaillaan käynnissä kymmeniä projekteja, joissa kehitetään menetelmiä havaita häiriöitä videokuvan perusteella. Esimerkkeinä voidaan mainita muun muassa IMPACYS, AUTOSCOPE, CCATS, CCIDS, CTRACK, VIC ja AID-järjestelmät (Wang & Sisiopiku 1998). Eräs esimerkki CCATS-sovelluksesta on Liegen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmä (Rollus ym. 1998).

Videokuvamenetelmät perustuvat kolmeen periaatteeseen: Ensimmäisessä kameraa käytetään induktioilmaisimen tapaan (esimerkkinä AUTOSCOOP). Menetelmällä on samat heikkoudet kuin perinteisillä häiriöidenhavaitsemisalgoritmeilla. Ilmaisimen tunnistamiskyky on myös voimakkaasti riippuvainen kameran sijainnista. Menetelmän etuna on kamerailmaisimen tehokkuus induktioilmaisimiin verrattuna. Yksi kamerailmaisim voi vastata kolmesta kuuteen induktioilmaisinta. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Toinen periaate on seurata kameralla yksittäisiä ajoneuvoja ja saada näin mikroskooppisia tietoja ajoneuvojen liikkeestä, jotka kuvastavat liikennevirtaa. Tällaisia asioita ovat mm. äkilliset kaistanvaihdot ja paikallaan olevat ajoneuvot, joita on vaikea havaita perinteisin keinoin. Menetelmän heikkous on se, että jos häiriö tapahtuu kameras näkymättömissä, se jää havaitsematta (Wang & Sisiopiku 1998). Esimerkkeinä menetelmästä ovat Japanin AID-järjestelmä (Shinozaki ym. 1998) ja DRIVE:n INVAID-projekti, joka tutkii häiriöiden havaitsemista paikallaan olevien tai hitaasti liikkuvien ajoneuvojen tunnistamisen avulla. Newcastle'n yliopiston (University of Newcastle) FAST-Q-järjestelmä havaitsee jonossa olevat ajoneuvot (Bell 1994).

Periaatteista viimeinen käyttää liikennevirran tilallisia ja ajallisia parametrejä epätavallisen ruuhkan tai liikenteen jonoutumisen tunnistamiseen. Esimerkkinä periaatteen soveltamisesta on IMPACTS. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Etuina videokuvaa hyväksi käyttävissä menetelmissä on niiden kyky havaita paikallaan olevia ja hitaasti liikkuvia ajoneuvoja, korkea havaitsemisaste (77 – 100 %) yhdistettynä nopeaan havaitsemisaikaan, induktioilmaisimiin verrattuna alhaiset asennus- ja ylläpitokustannukset, mahdollisuus saada tilallisia tietoja liikennevirrasta samoin kuin aikariippuvaisia parametrejä sekä se, että raakadata saadaan helposti tallennettua ja yhdistettyä muihin järjestelmiin. (Wang & Sisiopiku 1998.)

Vaikka videokuvaa hyväksi käyttävillä tekniikoilla on mahdollisuus korvata induktioilmaisimet datan keräämisessä, silti ratkaistava on monta ongelmaa. Ilmaisten toimivuus on ensinnäkin riippuvainen hyvästä taustakuvasta. Myös liikennevalot, sää ja vuorokaudenaika vaikuttavat toimivuuteen. Häiriönhavaitsemisaika on riippuvainen järjestelmän prosessointitehosta (Wang & Sisiopiku 1998). Usein videota kuitenkin käytetään yhä käsin täydentämään muita häiriöidenhavaitsemisjärjestelmiä (Bell 1994).

1990-luvulla on julkaistu suuri määrä tutkimuksia, jotka käsittelevät neuroverkko-sovelluksia häiriöiden havaitsemisessa. Neuroverkkoja käytettäessä pitäisi verkon opettamiseen olla käytössä tietokanta sekä häiriöttömästä liikenteestä että liikenteen häiriöistä erilaisilla tiegeometrioilla. Perinteisillä reaaliajassa toimivilla hahmontunnistusalgoritmeilla on haittana, että kaikkien muuttujien pitää olla jatkuvia, koska laskenta perustuu aina edellisiin havaintoihin. Datan katkeaminen vaikuttaa voimakkaasti tuloksiin ja järjestelmältä menee toipumiseen pitkä aika. Neuroverkkosovellukset sitä vastoin perustuvat aikaisempaan dataan eikä datan katkeamisella ole vaikutusta. Ainoaksi hankaluudeksi jää siis riittävän hyvän tietokannan kokoaminen (Wang & Sisiopiku 1998). Dia & Rose (1997) ovat testanneet neuroverkkoon perustuvia häiriöidenhavaitsemisalgoritmeja suurella maastosta kerätyllä tietokannalla. He ovat myös selvittäneet datan määrän vaikutusta neuroverkkoihin perustuviin häiriöidenhavaitsemismalleihin (Dia & Rose 1998). Esimerkiksi Chang (1992) on havainnut omassa tutkimuksessaan juuri häiriödatan vähyyden aiheuttavan ongelmia verkon opettamisessa.

Toinen merkittävä tekoälysovellus, jota käytetään häiriöiden havaitsemisessa, on sumea logiikka. Muun muassa Kalifornia-algoritmia on parannettu sumean logiikan avulla. Perinteisissä menetelmissä on ongelmana, että päätöspuissa vastaus on aina joko 0 tai 1, vaikkei tilanne todellisuudessa olisi aivan niin selvä.

Sumealle logiikalle tällaiset epäselvät tilanteet eivät ole ongelma. Sumean logiikan etuja häiriöiden havaitsemisessa ovat sen sopeutuminen datan heilahteluihin ja epätarkkoihin tietoihin sekä sen sopeutuvat raja-arvot. Sumean logiikan heikkouksia ovat laskentamäärän lisääntyminen ja näin ollen muihin menetelmiin verrattuna tehokkaampien tietokoneiden tarve. Myös jäsennysfunktioiden määrittäminen saattaa olla vaikeaa (Wang & Sisiopiku 1998). Sumeaa logiikkaa käytetään erityisesti häiriön tapahtumipaikan ja vakavuuden estimoimiseen (Lee & Hwang 1998).

Anturiajoneuvolähestymistavassa häiriöiden havaitseminen perustuu anturiajoneuvojen välittämiin matka-aikatietoihin. Menetelmän etuna on sen helppo laajentaminen yksinkertaisesti lisäämällä anturiajoneuvojen määrää. (Wang & Sisiopiku 1998.)

4.3 Liikennetilanteen ennakointimenetelmät

4.3.1 Menetelmien välisiä vertailuja

Dynaamiset liikenneinformaatio- tai liikenteenohjausjärjestelmät eivät voi toimia reaktiivisesti, vaan niiden täytyy osata ennakoida liikennetilanteet ja sopeuttaa strategiansa ajoissa. Se, että järjestelmä pystyy jatkuvasti päivittämään liikennemäärä- ja matka-aikaennusteita useita minuutteja eteenpäin käyttämällä reaaliaikaista liikennedatata, on ehdoton dynaamisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien toiminnan edellytys. (Smith & Demetsky 1997.)

Smith & Demetskyn (1997) tekemässä vertailussa tutkittiin kahta uutta liikenteennustamismenetelmää, jotka perustuivat neuroverkkoon ja ei-parametrisen regressiomalliin, sekä kahta perinteistä mallia, jotka perustuivat aikaisempaan keskiarvoon ja aikasarjoihin. Vertailussa lähdettiin siitä, että mallilla on saatavilla tieto kohteen sen hetkisestä liikennemäärästä $Q(t)$ ja ennustejakson ajan (t , tässä tapauksessa viimeisen 15 minuutin) liikennemäärätiedot. Lisäksi oletetaan, että mallilla on käytettävissä tietokanta, jonka avulla voidaan laskea liikennemäärälle keskiarvo Q_{hist} . Tehtävänä on siis ennustaa $Q(t + 15)$, kun tunnetaan $Q(t)$, $Q(t - 15)$, $Q_{hist}(t)$ ja $Q_{hist}(t + 15)$.

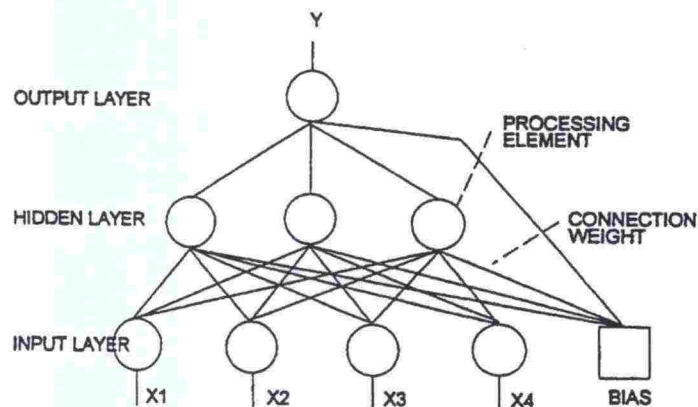
Tietokannan havaintojen keskiarvoon perustuva malli käyttää yksinkertaisesti aikaisempien liikennemäärien keskiarvoa lähitulevaisuuden arvojen ennustamiseen. Malli perustuu siis liikennevirran jaksolliseen luonteeseen eikä se voi reagoida liikenteen dynaamisiin muutoksiin, kuten häiriöihin. Malli perustuu yksinkertaiseen tietokantaan ja liikennemäärän ennusteen $Q(t + D)$ hetkellä t estimoidaan yksinkertaisesti olevan $Q_{hist}(t + D)$. (Smith & Demetsky 1997.)

Tilastolliset aikasarjamallit, kuten autoregressiiviset integroidut liukuvan keskiarvon mallit (ARIMA-mallit), perustuvat matemaattiseen malliin, jonka avulla pyritään selittämään aikasarjadatan aikaisempi käyttäytyminen ja ennustamaan tulevaa liikennettä. ARIMA-malli perustuu keskeytymättömään datasarjaan. Käytännön sovelluksissa dataa saattaa kuitenkin puuttua esimerkiksi viallisen ilmaimen takia. Tästä syystä aikasarjamalli ei sovellu erityisen hyvin laajamittaisiin

kenttäsovelluksiin, kuten moottoritieliikenteen ennustamiseen. (Smith & Demetsky 1997.)

Smith & Demetsky (1997) tekemässä vertailussa käytettiin yksinkertaista ARIMA-mallia, joka perustui kunkin aikajakson keskiliikennemäärään kultakin viikonpäivältä. Malli rakennettiin viideltä peräkkäiseltä päivältä olevan datan perusteella siten, ettei datassa ollut katkoksia. ARIMA(2, 1, 0)-prosessi määriteltiin ja sille estimoitiin parametrit tilastollisen ohjelmiston avulla.

Neuroverkot ovat matemaattinen mallintamismenetelmä, jota on viime aikoina käytetty runsaasti liikennetekniikassa. Yleisimmin käytetty neuroverkko perustuu vastavirta-algoritmiin (back-propagation). Myös Smith & Demetsky (1997) valitsivat tämän neuroverkon vertailuunsa, koska sen taustalla on perusteellinen teoria ja koska se soveltuu jatkuvien muuttujien välisten riippuvaisuuksien ennustamiseen. Vastavirta-algoritmiin perustuva neuroverkko (kuva 12) saa syötteet (kuvassa $X_1 - X_4$) syötekerrokseen (input layer, kuvassa alhaalla), välittää painotetut syötearvot summattaviksi piilokerrokseen tai piilokerrokseen (hidden layer), painottaa summat ja välittää ne tulostuskerrokseen (output layer). Vastavirta-algoritmiin perustuva neuroverkko oppii eri kerroksien elementtien välillä olevat painokertoimet (mallin parametrit) opetusjoukon avulla. Verkko on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi monimutkaisten epälineaaristen riippuvaisuuksien esittämiseen. Sitä on kuitenkin mahdollista yliopettaa, jolloin se oppii opetusjoukon ulkoa eikä osaa yleistää muuttujien välisiä riippuvaisuuksia. Tehokkaan mallin tuottamiseksi onkin oltava suuri opetusjoukko ja mallintajan on tiedettävä, milloin opettaminen on parasta lopettaa.



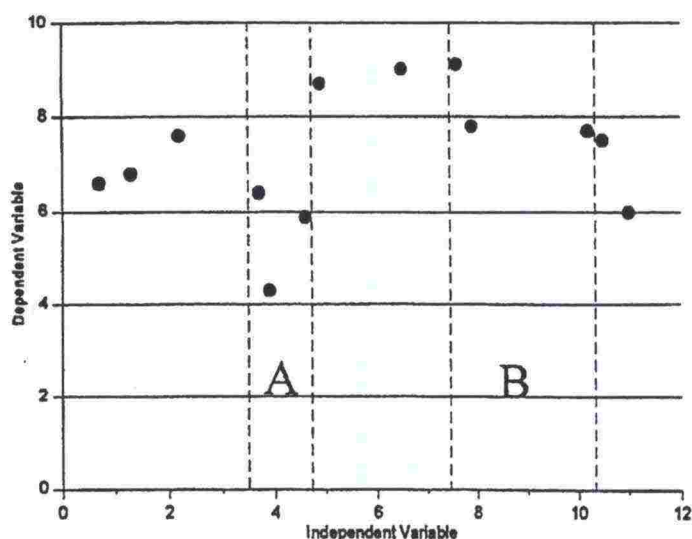
Kuva 12. Vastavirta-algoritmiin perustuva neuroverkko (Smith & Demetsky 1997).

Vertailua varten rakennetussa neuroverkossa oli yksi piilokerros, jossa oli kymmenen piiloelementtiä. Mallia ei opetettu uudelleen toista koepaikkaa varten. Ajateltiin, että verkon on kyettävä toimimaan useammassa kohteessa ilman uudelleen kalibrointia. Näin tienpitäjän ei tarvitse oppia neuroverkkojen opettamista. (Smith & Demetsky 1997.)

Ei-parametrillä regressiomallia voidaan ajatella dynaamisena klusterointimallina. Menetelmässä yritetään etsiä aikaisempien havaintojen joukkoja, joilla on vastaavanlaiset syötteet kuin järjestelmällä ennustehetkellä. Sitä pidetään dynaamisena, koska se määrittelee nykytilaa vastaavien aikaisempien havaintojen jou-

kon joka kerta erikseen sen sijaan, että ryhmittelisi havainnot jo etukäteen. Ei-parametrisistä regressiomenetelmistä liikennetekniikassa on usein käytetty lähimmän naapurin -menetelmää. Menetelmässä naapurit on määritetty niinä k :na havaintona, jotka sijaitsevat lähimpänä syötettä. Kun naapurit on saatu määritettyä, estimaatin laskeminen on helppoa. Estimaatti määritellään naapureiden vastearvojen keskiarvona. Vertailua varten Smith & Demetsky (1997) ohjelmoivat lähimmän naapurin määritelmän, jotta ennustaminen saatiin automatisoitua. Vertailussa tietokanta rakennettiin (liikennetilanne, tuleva liikennemäärä)-pareista. (Smith & Demetsky 1997.)

Yksinkertaisena esimerkkinä lähimmän naapurin -menetelmästä oletetaan muuttujien x ja y välille riippuvaisuus $f(x) = y$, josta parametrin y arvo halutaan estimoida x :n arvoille 4 ja 9. Tietokannassa löytyy 13 aikaisemmin havaittua (x, y) -paria kuvan 13 mukaisesti. Oletetaan, että naapureiden lukumäärä on 3, ja määritellään halutuille x :n arvoille naapurit, jotka ovat siis ne kolme havaintoa, joiden x -arvot ovat lähinnä haluttuja pisteitä. y :n estimaatit saadaan sitten näiden havaintojen y -arvojen keskiarvona. Tässä esimerkin tapauksessa y :n estimaatit olisivat 5,6 ja 8,2. (Smith & Demetsky 1997.)



Kuva 13. Esimerkki lähimmän naapurin -menetelmästä, jossa etsitään y :n estimaattia x :n arvoille 4 ja 9 (Smith & Demetsky 1997).

Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto mallien heikkouksista ja vahvuuksista moottoriteliikenteen ennustamisessa. (Smith & Demetsky 1997.)

Taulukko 5. Mallien välinen vertailu (Smith & Demetsky 1997).

Malli	Vahvuudet	Heikkoudet
Keskiarvo	<ul style="list-style-type: none"> • Helppo ottaa käyttöön • Nopea laskea 	<ul style="list-style-type: none"> • Ei kykene vastaamaan odottamattomiin tapahtumiin
ARIMA	<ul style="list-style-type: none"> • Aikasarjasovellus • Taustalla vahva teoria 	<ul style="list-style-type: none"> • Puuttuvat havainnot tuottavat ongelmia
Neuroverkko	<ul style="list-style-type: none"> • Sopiva monimutkaisten, ei-lineaaristen riippuvaisuuksien kuvaamiseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Black box -malli • Monimutkainen opettamisproseduuri
Ei-parametrinen regressio	<ul style="list-style-type: none"> • Ei vaadi oletuksia olemassa olevista riippuvaisuuksista • Hahmontunnistussovellukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Naapureiden löytämisen hankaluus

Smith & Demetsky (1997) vertailivat malleja Pohjois-Virginiasta kerätyn tietokannan avulla. Mallien hyvyyttä testattiin neljän parametrin avulla: absoluuttisella virheellä, jakaumavirheellä, mallin käyttöönottamisen helppoudella ja mallin siirrettävyydellä. (Mallit rakennettiin Telegraph Roadin koepaikalle.) Kahden koepaikan tuloksien absoluuttiset virheet ja jakaumavirheet on esitetty taulukoissa 6 ja 7. Taulukoiden tulosten avulla on selvää, että lähin naapuri -menetelmä on parempi kuin muut. Toiseksi parhaaksi osoittautui neuroverkko ja kolmanneksi jäi -keskiarvomalli. ARIMA-mallia ei voida käyttää vajaalla datalla, joten se jätettiin tämän testin ulkopuolelle. Muita tuloksia tarkastellen ARIMA-malli voidaan kuitenkin sijoittaa hieman keskiarvomallia paremmaksi.

Taulukko 6. Ennustemenetelmien tuloksien absoluuttiset virheet kahdella koepaikalla (Smith & Demetsky 1997).

Malli	Telegraph Road		Woodrow Wilson Bridge	
	(ajon./h)	%	(ajon./h)	%
Keskiarvo	214,6	9,57	300,4	9,86
Neuroverkko	182,5	8,93	450,3	11,00
Lähin naapuri	167,3	7,54	229,3	8,07
ARIMA	195,0	9,03		

Taulukko 7. Ennustemenetelmien tuloksien jakaumavirheet kahdella koepaikalla. Luku kuvaa sitä osuutta ennusteissa, joka oli yli 10 tai 20 prosenttia todellista arvoa pienempi tai suurempi (Smith & Demetsky 1997).

Malli	Telegraph Road				Woodrow Wilson Bridge			
	Yli 10 % virhe		Yli 20 % virhe		Yli 10 % virhe		Yli 20 % virhe	
	Aliarv.	Yliarv.	Aliarv.	Yliarv.	Aliarv.	Yliarv.	Aliarv.	Yliarv.
Keskiarvo	14,02	19,30	3,95	6,95	13,99	19,85	4,60	6,33
Neuroverkko	24,08	7,28	10,02	1,75	32,86	12,11	14,47	5,58
Lähin naapuri	13,31	10,98	1,87	4,08	11,01	14,58	1,53	4,68
ARIMA	16,67	16,15	5,21	5,21				

Lähin naapuri -menetelmä osoittautui siis parhaaksi. Sen tekemä absoluuttinen keskivirhe oli merkittävästi pienempi kuin muiden mallien. Mallin tehokkuutta kuvaa myös se, että yli 75 prosenttia ennustevirheistä oli alle 10 prosenttia. Malli on lisäksi helppo ottaa käyttöön uusissa kohteissa. Se tarvitsee ainoastaan tietokannan kyseisen paikan aikaisemmista liikennetilanteista. (Smith & Demetsky 1997.)

Keskiarvomallilla saatiin suurimmat absoluuttiset keskivirheet, vaikkei sillä ollutkaan taipumusta yli- tai aliarvioida ennusteitaan vahvasti. Vaikkei malli siis tuotakaan täsmälleen oikeita estimaatteja, ne ovat kuitenkin melko lähellä oikeita arvoja. Malli vaikutti yliarvioivan ennusteita useammin kuin aliarvioivan niitä. Keskiarvomenetelmän tulokset olivat hyvin samaa tasoa kummassakin koepaikassa, mikä osoittaa menetelmän hyvän siirrettävyyden. (Smith & Demetsky 1997.)

ARIMA-mallin absoluuttiset virheet olivat samaa suuruusluokkaa kuin muilla malleilla, mutta se yli- tai aliarvioi ennusteitaan usein huomattavasti. ARIMA-mallia voitiin kuitenkin soveltaa ainoastaan kahden päivän datalle tietokannan kahden kuukauden datasta, mikä osoitti, ettei se sovellu käytännön tilanteisiin. ARIMA-malli jätettiin pois toisen koepaikan testeistä. (Smith & Demetsky 1997.)

Neuroverkko osoittautui vertailussa toiseksi parhaaksi. Mallin ongelma oli kuitenkin huomattava jakaumavirhe. Ongelman aiheuttaja on todennäköisesti neuroverkon opetus. Opetusjoukon havaintojen seassa olleet muutamat liikenteenhäiriötilanteet ovat voineet saada koko verkon aliarvioimaan estimaattejaan, minkä takia opetusjoukon valintaan tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Neuroverkko-

mallin tekemät virheet olivat toisessa koepaikassa huomattavasti suurempia kuin ensimmäisessä. Tämä osoittaa sen, ettei neuroverkkomalli ole siirrettävissä, vaan se pitäisi opettaa jokaisesta sellaisesta kohteesta kerätyllä datalla, jossa sitä aiotaan käyttää. (Smith & Demetsky 1997.)

Smith & Demetsky (1994) tekivät jo aikaisemmin vastaavanlaisen vertailun neuroverko-, ARIMA- ja keskiarvomallin välillä. Tämän vertailun tulokset olivat hyvin samansuuntaisia. Keskiarvomalli toimi hyvin "tavallisina" päivinä (5 - 6 prosentin virhetasolla), muttei kyennyt reagoimaan epätavallisiin tilanteisiin, jotka vaikuttivat liikennemääriin. ARIMA-mallin ennuste tuntui laahaavan jatkuvasti yhden tarkastelujakson jäljessä. Malli myös tuntui liioittelevan ennustetta ylä- tai alakanttiin vahvasti. Neuroverkkomalli selviytyi ennustamisesta tarkasti, erityisesti ruuhkahuipun aikana, eikä ennuste kärsinyt ARIMA-mallin ongelmista.

Myös Lee ym. (1998) ovat tehneet vertailun erilaisten matkanopeuksien lyhyen aikavälin ennustamismenetelmien välillä. He vertasivat usean selittäjän ensimmäisen asteen regressiomallia, ARIMA(1, 1, 0)-mallia, vastavirta-algoritmiin perustuvaa neuroverkkomallia, jossa oli yksi piilokerros, ja Kalman-suodatinmallia. Heidän tulostensa mukaan neuroverko- ja Kalman-suodatinmalli tekivät tarkempia ennusteita kuin regressio- tai ARIMA-malli. Kalman-suodatinmalli oli jonkin verran parempi kuin neuroverko, mutta neuroverko antoi parempia tuloksia, kun malli siirrettiin alkuperäisestä kohteestaan muualle.

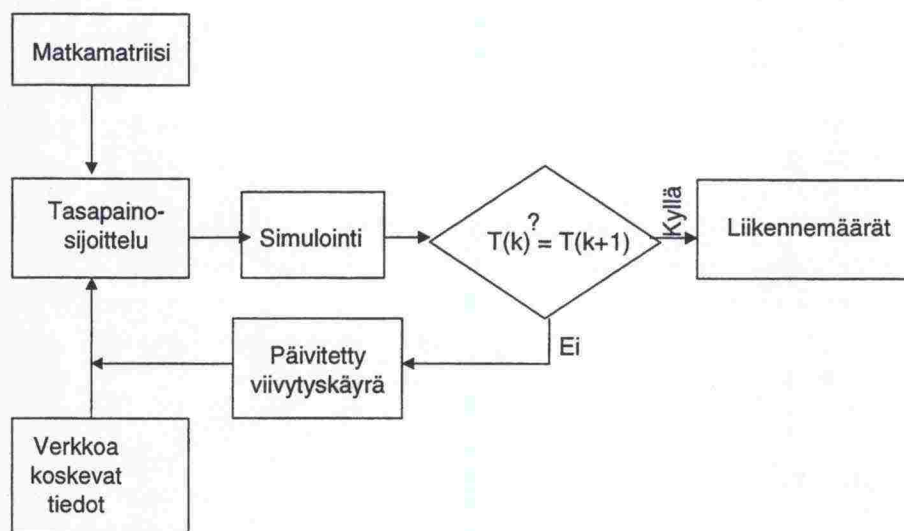
4.3.2 Sijoittelu ja simulointi

Hobeika & Ozbay (1991) ovat kehittäneet simulointi- / liikenteensijoittelumallin, jonka päätarkoitus on testata erilaisia reittiohjausstrategioita, jotta liikenneverkko saataisiin toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla. Malli yrittää saavuttaa käyttäjäoptimin etsimällä liikenteensijoittelulla sellaisen ratkaisun, jossa jokainen kuljettaja ajaa kulloisessakin tilanteessa nopeinta reittiään. Mallin antamia tuloksia voidaan käyttää matka-aika- ja viivytysennusteina reaaliaikaisissa liikennetietojärjestelmissä.

Malli käyttää iteratiivista prosessia ennustaessaan liikennevirtoja ja jonoja sitä mukaa, kun ne muuttuvat. Malli perustuu siihen, että simulointimallin tuloksena saatuja tietoja käytetään hyödyksi liikenteensijoittelussa, jotta löydetään nopein mahdollinen reitti kullekin lähtöpaikka-määräpaikkaparille verkolla. Menettely toistetaan, kunnes saavutetaan tasapaino. (Hobeika & Ozbay 1991.)

Aikaulottuvuuden sisällyttämiseksi kokonaisanalyysijakso on jaettu osajaksoihin. Jos kokonaisaika on esimerkiksi 60 minuuttia, osajaksot voivat olla 15 minuuttia pitkiä. Malli osaa vastata nopeasti verkon vaihtuviin liikenneolosuhteisiin käyttämällä ajantasaista informaatiota liikenneolosuhteista generoidessaan matkatalukkoa kullekin aikajaksolle. Kunkin tällaisen osajakson aikana toinen ohjelma syöttää järjestelmään uuden 15 minuutin lähtöpaikka-määräpaikkamatriisin. Mallin yksinkertaisuuden varmistamiseksi voidaan olettaa, että kunkin 15 minuutin mittaisen osajakson aikana lähtöpaikka-määräpaikkamatriisi pysyy muuttumattomana. (Hobeika & Ozbay 1991.)

Myös Stephanedes ym. (1990a) ovat käyttäneet liikenteen sijoittelua ja simulointia ennustamiseen. Heidän menetelmänsä käyttää tietoja liikenteen lähtöpaikkamääräpaikkapareista ja tiegeometriasta sekä päivitettyjä, kenttadatasta johdettuja tietoja liikenteen sujumisesta ja käyttäytymisestä reaaliaikaisten liikennemääräestimaattien tuottamiseen *kuvan 14* mukaisesti. Menetelmä perustuu iteratiiviseen palautesilmukkaan sijoittelu- ja simulointivaiheen välillä. Sijoitteluvaihe jakaa matkat verkolle ja simulointivaihe tuottaa yksityiskohtaista tietoa liikenneverkon toiminnasta. Silmukka lakkaa toimimasta, kun kahdella peräkkäisellä iterointikierroksella tulokseksi saadut linkkien matka-ajat ovat riittävän lähellä toisiaan.



Kuva 14. Ennustemallin rakenne (Stephanedes ym. 1990a).

Simulointivaiheen tavoitteena on tuottaa yksityiskohtaista tietoa linkkien matka-ajoista kulloisellakin liikenteellä. Sijoitteluvaiheen tavoitteena taas on sijoitella matkat liikenneverkolle ottaen huomioon matka-ajan ja liikennemäärän välinen suhde, joka on määritelty jokaiselle linkille tai linkkijoukolle verkolla. Prosessin aloittaminen vaatii tietoa liikenneverkon rakenteesta sekä matkataulukon. Sijoitteluvaiheessa käytetään liikennemäärä-viivytyskäyriä (BPR-käyrät) matkojen jakamiseksi verkolle. Simulointivaihe estimoi linkkikohtaiset matka-ajat edellä estimoidulla matkajakaumalla. Näitä matka-aikoja verrataan alkuperäisestä tasapainosijoittelusta saatuihin arvoihin. Jos ero on riittävän pieni, prosessi lopetetaan ja tulokseksi saadaan liikennemääräestimaatit. Muuten simulointivaiheen tarjoamia tietoja käytetään päivitettyjen linkkikohtaisten viivytyskäyrien määrittämiseen. (Stephanedes ym. 1990a.)

Stephanedes ym. (1990a) testasivat menetelmää tyypillisellä moottoritiejaksolla (liittymis- ja erkanemisramppeineen) ja eräällä pääkadulla mallin tarjoamien estimaattien tarkkuuden arvioimiseksi ja vertaamiseksi perinteisten sijoittelumallien antamien tulosten kanssa. He saivat tulokseksi, että useimmissa tapauksissa simulointi-/sijoittelumenetelmän avulla saadut tulokset olivat lähempänä havaittuja tuloksia kuin perinteisillä liikenteensijoittelumenetelmillä saadut tulokset.

Menetelmän moduulirakenne ja simulointivaihe ovat sen vahvuus, koska tutkittua liikenneverkkoa voidaan kuvata sille parhaiten sopivalla simulointi- ja sijoitte-

lumallilla. Näin ollen menetelmän käyttöalue on laaja verrattuna muiden vastaavien menetelmien käyttöalueeseen. Mallin antamat tulokset ovat sitä tarkempia mitä sopivammilla komponenteilla (esim. simulointiohjelma ja sijoittelumenetelmä) estimointia suoritetaan ja mitä tarkempi on lähtöpaikka-määräpaikkamatriisi. (Stephanedes ym. 1990a.)

4.3.3 Kalman-suodatus

Hollannissa Rotterdamin ympäristöön asennettiin vuonna 1994 tiheä liikenteen-seurantajärjestelmä. Järjestelmä kattoi 200 kilometriä moottoriteitä, 12 päätieliitymää ja 50 poistumis- tai liittymisrampia. Tarkkailujärjestelmä koostui lähes tuhannesta induktioilmaisimesta, jotka oli liitetty 60:een tienvarrella sijaitsevaan prosessoriin, jotka muokkasivat datan minuuttikeskiarvoiksi ja välittivät tiedot liikennekeskukseen. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Liikenteenseurantajärjestelmää varten on suunniteltu ruuhkan ennustamisjärjestelmä, jonka tavoitteena on ennustaa suunnittain tielinkin kokonaisliikennemäärä ajoneuvoina minuuttia kohti, ruuhkatilanne (kyllä/ei) ja keskimääräinen matka-aika. Tienpitäjä ja poliisi voivat käyttää näitä tietoja ennusteena tulevista olosuhteista, erityisesti ennakkovaroituksena ruuhkan alkamisesta tai jatkumisesta tietyillä tielinkeillä ja verkolla jo oleville tienkäyttäjille sekä matkaan lähdössä oleville voidaan tarjota tietoa odotettavissa olevista pullonkauloista ja viivytyksistä. Liikennetietoja voidaan tarjota myös (kaupallisten) reittiopastusjärjestelmien käyttöön. Liikenteenhallinnassa tietoja käytetään hyväksi dynaamisessa liikenteenohjaustoimenpiteissä. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Järjestelmän päätavoitteena on tuottaa ennusteita reaaliaikaisesti siten, että ennusteet ovat riittävän tarkkoja ja että järjestelmä kykenee tuottamaan ennusteita kaikissa olosuhteissa (satunnaisessa ruuhkassa, onnettomuuksien ja tietöiden aikana jne.). Järjestelmän on myös kyettävä ottamaan ennusteissaan huomioon dynaamiset liikenteenohjaustoimenpiteet ja niiden vaikutukset. Hollannissa kaikki nämä vaatimukset täyttämään valittiin DYNA-DTMS-malli, joka käyttää tietolähteinä reaaliaikaista liikennedatata (minuuteittain liikennemäärät, nopeudet, varausasteet ja häiriöiden läsnäolo linkillä), liikenteestä koottua tietokantaa (lähtöpaikka-määräpaikkamatriisi) sekä liikenneverkon infrastruktuuritietoja. Malli on yhdistelmä tilastollisesta liikennemallista ja dynaamisesta liikenteensijoittelumallista. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Tilastollista mallia käytetään erittäin lyhyen aikavälin (1 - 10 (tai 15) minuuttia eteenpäin) ennusteiden tekemiseen. Kaksi pääsyytä tilastollisen mallin valitsemiseen olivat mallin nopeus (tekee ennusteen 1 - 2 minuutissa) ja tulosten tarkkuus (erittäin lyhyen aikavälin ennusteissa). Näissä erittäin lyhyen aikavälin ennusteissa reitin valinnalla ei ole suurta merkitystä, minkä takia tilastollisen mallin melko yksinkertainen kuljettajan reitinvalintaproseduuri ei vaikuta tuloksiin. Ennustamiseen valittiin Kalman-suodatin, koska se suodattaa liikennemittauksen reaaliajassa, tuntuu luonnolliselta valinnalta ennusteiden tuottamiseen, on joustava, kalibroi itse itsensä eikä siinä ole stationaarisuusoletuksia ja koska se pitää luonnostaan sisällään häiriöiden havainnoinnin. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Kalman-suodattimen perusajatus on siinä, että haluttujen muuttujien arvot ennustetaan aiempaan systeemistä olevaan informaatioon perustuen siihen hetkeen asti, kunnes uusi mittaus on käytettävissä. Kun uusi mittaustulos sitten saadaan käyttöön, muuttujan estimaattia korjataan mittauksen ja ennusteen väliin erotukseen verrannollisena. (Karvonen ym. 1982.)

Tilastollista menetelmää täydentämään valittiin dynaaminen liikenteensijoittelumalli (DTA), jonka tehtävänä on tehdä pidemmän aikavälin ennusteita. Tällaisissa ennusteissa kuljettajan reitinvalinnalla on suurempi merkitys. Erityisesti tilanteissa, joissa dynaamisen liikenteenohjauksen vaikutukset täytyy ottaa huomioon, DTA:lla on huomattavia etuja mekaanisiin tilastollisiin malleihin verrattuna (ainakin teoriassa). DTA:ssa on kuitenkin kaksi haittapuolta: mallit ovat hitaita ja ne tarvitsevat dynaamisen lähtöpaikka-määräpaikkamatriisin lähtötiedoikseen. Ensimmäinen ei ole ongelma, kunhan malli tekee ennusteen 15 minuutissa, mutta toisen haitan korjaamiseksi malliin pitää liittää dynaaminen lähtöpaikka-määräpaikkamatriisin estimointimoduli. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Viimeiseksi tehtäväksi jää yhdistää tilastollisen mallin ja dynaamisen liikenteensijoittelumallin avulla tehdyt ennusteet siten, että saatu ennuste on mahdollisimman tarkka. Eräs tapa tehdä tämä on laskea ennusteista painotettu keskiarvo siten, että painokertoimina käytetään ennustejakson pituutta ja pyritään minimoimaan yhdistetyn ennusteen varianssi. Painokertoimien optimiarvot saadaan kalibroitua empiirisesti, kun mallit ovat toiminnassa. (Ben-Akiva ym. 1992.)

Stephanedes ym. (1990b, Kwon 1991, Stephanedes 1991) halusivat kehittää moottoritiliikenteen kysynnälle ja jakautumiselle luotettavan ennustusalgoritmin, joka tunnistaa liikennevirran ominaisuudet reaaliajassa ja jota voidaan käyttää dynaamisessa liikenteenohjauksessa ja ajoneuvojen opastamisessa. Myös heidän mallinsa käyttää liikenteen jakauman ennustamisessa rekursiivista parametrien tunnistamista, joka perustuu laajennettuun Kalman-suodattimeen.

Liikenteen kysynnän jakautumista moottoritierampeille kuvaavaa mallia varten tehtiin kaksi päähypoteesia: 1) moottoritiliikenteen kysyntää voidaan käsitellä päätöksentekona, joka on riippuvainen ramppiohjauksesta ja rampeilla vallitsevista liikenneolosuhteista hyödynmaksimointiperiaatteiden mukaisesti, ja 2) rampin liikenneolosuhteet eivät vaikuta siihen moottoritien kokonaisliikennemäärään, joka lähestyy ramppia. (Stephanedes ym. 1990b, Kwon 1991.)

Hypoteesit johtavat kahteen malliin. Ensimmäinen malli ennustaa jokaista aikajaksoa kohti rampille saapuvien ajoneuvojen osuuden niistä ajoneuvoista, joiden olisi mahdollista tulla rampille. Malli osoittaa, että rampille tulevien ajoneuvojen osuus on nykyisen moottoritiele pääsevien ajoneuvojen määrän ja edellisellä aikajaksoilla rampilla olleiden ajoneuvojen määrän funktio. Toinen malli käyttää tietokannan tietoja niiden ajoneuvojen määrän ennustamiseen, joiden olisi mahdollista tulla rampille. (Stephanedes ym. 1990b, Kwon 1991, Stephanedes 1991.)

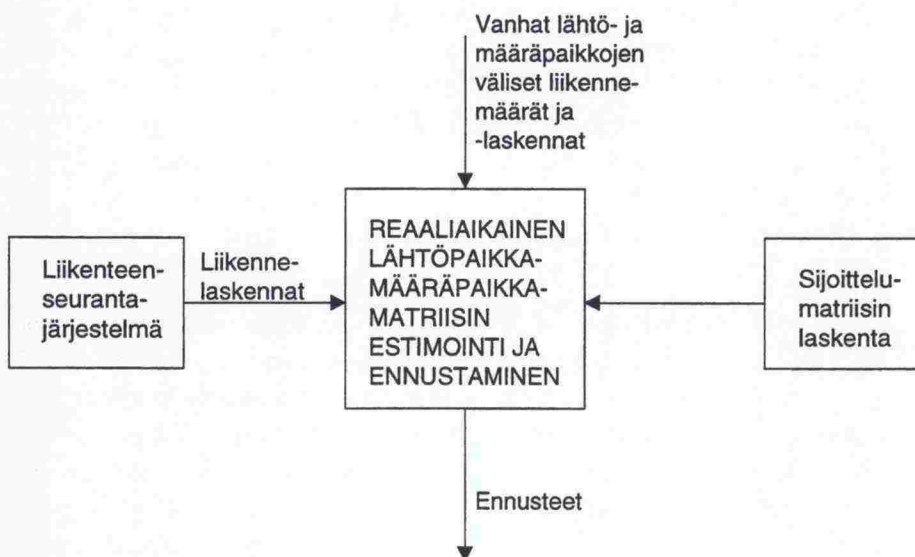
Kaikki mallin tarvitsemat tiedot voidaan mitata helposti maastossa. Malleja ei kuitenkaan voida tällaisenaan käyttää reaaliaikaisessa liikenteenohjauksessa, koska ne sisältävät virhettä. Tästä syystä on kehitetty suora ennustusmenetelmä, joka käyttää laajennettua Kalman-suodatinalgoritmia. Mallin parametrejä päivitetään jatkuvasti laajennetun Kalman-suodattimen avulla käyttämällä ennustemalleja havaintoyhtälöinä. (Stephanedes ym. 1990b.)

Stephanedes ym. (1990b, Kwon 1991, Stephanedes 1991) testasivat mallia koe-datalla, joka oli I-35W-moottoritietä Minneapolisista. Keskimääräinen liikenteen-jakauman ennustevirhe (rampille saapuvan liikenteen osuutena) vaihteli välillä 5,4 - 8,8 prosenttia. Keskimääräinen ennustevirhe niiden ajoneuvojen määrässä, joiden olisi ollut mahdollista tulla rampille, oli korkea: 6,1 - 13,4 prosenttia. Jälkimmäisen virheen suuruus saattaa johtua siitä, ettei ennusteessa käytetty hyväksi ylävirran liikennetietoja. Vaikka malli kaipaakin vielä jatkokehitystä, se on todistanut tehokkuutensa. Mallin tulokset ovat riittävällä tarkkuudella oikeita eikä virhe kasva ennustejakson pidentessä.

Ashok & Ben-Akiva (1993) ovat kehittäneet periaatteet reaaliaikaiseen aikariip-puvaisten lähtöpaikka-määräpaikkamatriisien estimoimiseen ja ennustamiseen. Ongelma on muotoiltu Kalman-suodattimeksi, jossa tilavektori koostuu eroista, joita lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisissä liikennemäärissä on edellisiin esti-maatteihin verrattuna. Lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisten liikennevirtojen vaihteluiden ennusteita muokataan kunkin aikajakson lopulla saatujen linkkikoh-taisten liikennelaskentojen tulosten perusteella. Tässä prosessissa käytetään hyödyksi tietoja verkolla jo olevien ajoneuvojen matka-ajoista ja reitinvalinnasta. Sen lisäksi, että lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit generoidaan kulloisellekin ny-kyhetkelle, mallin avulla voidaan tehdä ennusteita tulevasta ja päivittää aikai-sempia matriiseja.

Oletetaan, että lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit on estimoitu datasta useille edellisille päville tai kuukausille. Nämä jo estimoidut matriisit pitävät sisällään runsaasti tietoa riippuvaisuuksista, jotka vaikuttavat liikenteen kysyntään, sekä niiden vaihteluista tilassa ja ajassa. Eräs yksinkertainen tapa ottaa nämä riippu-vaisuudet huomioon on sisällyttää kaikki aikaisemmat estimaatit ennustuspro-sessiin. Yksinkertaisin tapa tehdä tämä on käyttää Kalman-suodattimen tilavek-toreina lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisien liikennemäärien eroja parhaista olemassa olevista aikaisempiin tietoihin perustuvista estimaateista sen hetkisten liikennemäärien sijaan. (Ashok & Ben-Akiva 1993.)

Kuva 15 esittää reaaliaikaiseen lähtöpaikka-määräpaikkamatriisin estimointimo-duliin tulevat lukuisat syötteet ja siitä lähtevät vasteet. Kunkin aikajakson lopussa moduli saa lähtöpaikka-määräpaikkaparien väliset aikaisemmat liikennemäärät tietokannasta sekä linkkien liikennelaskennan kyseistä aikajaksoa koskevat tu-lokset liikenteenseurantajärjestelmältä. Lisäksi se saa sijoittelumatriisien esti-maatit. Sijoittelumatriisien täytyy puolestaan olla tunnettuja, jotta voidaan muo-dostaa Kalman-suodattimen mittaussyhtälöt. Vertaamalla linkkien liikennelasken-tojen tuloksia sijoitteluestimaattien liikennemäärien kanssa lähtöpaikka-määrä-paikkamatriisin estimointimoduli päivittää ("suodattaa") näitä estimaatteja. Tä-män jälkeen estimoinnit tehdään seuraaville aikajaksoille ja prosessi jatkuu. (As-hok & Ben-Akiva 1993.)



Kuva 15. Reaaliaikaiset vuorovaikutukset dynaamisessa lähtöpaikka-määräpaikkamatriisin estimointi- ja ennustusmenetelmässä (Ashok & Ben-Akiva 1993).

Ashok & Ben-Akiva (1993) testasivat ennustemallia koedatalla, joka oli eräältä 120 mailia pitkältä moottoritiejaksolta Massachusettsista, Yhdysvalloista. Jaksolla oli 15 liittymis- tai erkanemisramppeja. Ashok & Ben-Akiva havaitsivat, että suodatettu estimaatti oli huomattavasti lähempänä todellisia arvoja kuin vastaavat tietokannan tietoihin perustuvat estimaatit. Ennusteen laatu heikkeni progressiivisesti ja ennustetuilla estimaateilla oli taipumus konvergoida tietokannan tietoihin perustuvien estimaattien kanssa, kun ennusteaika piteni. Tämä oli tosin odotettavissa ennustemallin autoregressiivisen rakenteen takia.

Suodattimen toiminnan testaamiseksi Ashok & Ben-Akiva (1993) kokeilivat ennusteprosessia huonon tietokannan omaavalle datalle siten, että tehtiin useampi suodatus. He saivat tulokseksi, ettei suodatettujen estimaattien laatu ole erityisen herkkä tietokannan tietojen laadulle.

4.3.4 Neuroverkot ja sumea päättely

Matsui & Fujita (1998) ovat kehittäneet neuroverkkoihin ja sumeaan päättelyyn perustuvan matka-ajan ennustamismenetelmän moottoriteiden liikenneinformaatiojärjestelmien käyttöön. Mallissa käytetään ennusteen syötetietoina matka-aikaa ajoneuvon lähtöhetkellä ja tiejaksolla olevien ajoneuvojen lukumäärää. Ajoneuvojen määrä (N) saadaan estimoitua seuraavan kaavan avulla.

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{V_i} L_i$$

Yhtälössä i on ilmaisimen numero, Q_i on ilmaisimen i laskema keskimääräinen liikennemäärä (ajon./min), V_i keskinopeus, L_i ilmaisimen i edustama alue (km) ja

n on sen ilmaisimen numero, joka sijaitsee juuri ennen pullonkaulaa. (Luku 4.3.4 perustuu viitteeseen Matsui & Fujita (1998).)

Mallin rakentamista varten Matsui & Fujita (1998) jakoivat datan kahteen osaan: toinen mallin tarkkuuden testaamiseen ja toinen mallin opettamiseen. Sumeaa päättelyä varten tehtiin useita ohjaussääntöjä. Matka-ajan ennustamiseen liittyvät säännöt olivat

R1: Jos tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrä on varmasti suuri, matka-aika on pitkä.

R2: Jos tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrä on varmasti pieni, matka-aika on lyhyt.

Yllä olevat säännöt viittaavat siihen, että tarkasteltavalla tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrä vaikuttaa voimakkaasti siihen, kasvavatko vai pienenevätkö viivytykset ja matka-aika. Jotta neuroverkot saadaan mukaan ennustamiseen, säännöt pitää muuttaa numeeriseen muotoon. Raja-arvot määriteltiin neuroverkon avulla.

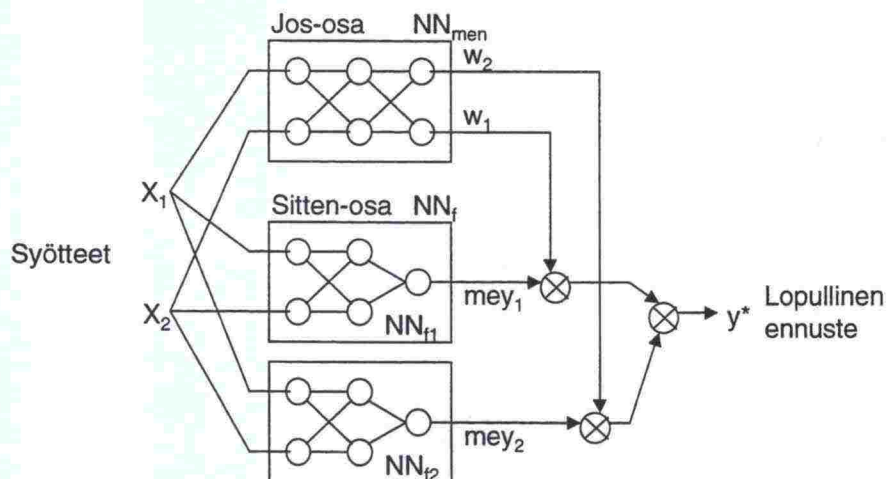
R1: Jos $x_2 \geq 200$ (ajon.), $y = \text{NNf}_1(x_1, x_2)$

R2: Jos $x_2 < 200$ (ajon.), $y = \text{NNf}_2(x_1, x_2)$

Säännöissä x_1 on nykyinen matka-aika ja x_2 tiejaksolla olevien ajoneuvojen lukumäärä. NNf_1 ja NNf_2 ovat neuroverkkoja. Jos-osan selkeillä joukoilla on sumean joukon piirteitä, koska ne korvaavat sumean logiikan jäsennysfunktion neuroverkolla. Säännön sitten-osa koostuu myös neuroverkosta.

Säännössä olevat neuroverkot on opetettu vastavirta-tekniikalla. Ennustemalli on esitetty kuvassa 16. Kuvasta nähdään, että jos-osan ja sitten-osan tulosten (w_i , mey_i) laskemisen jälkeen, lopullinen ennustearvo y^* saadaan näistä tuloksista seuraavan yhtälön avulla.

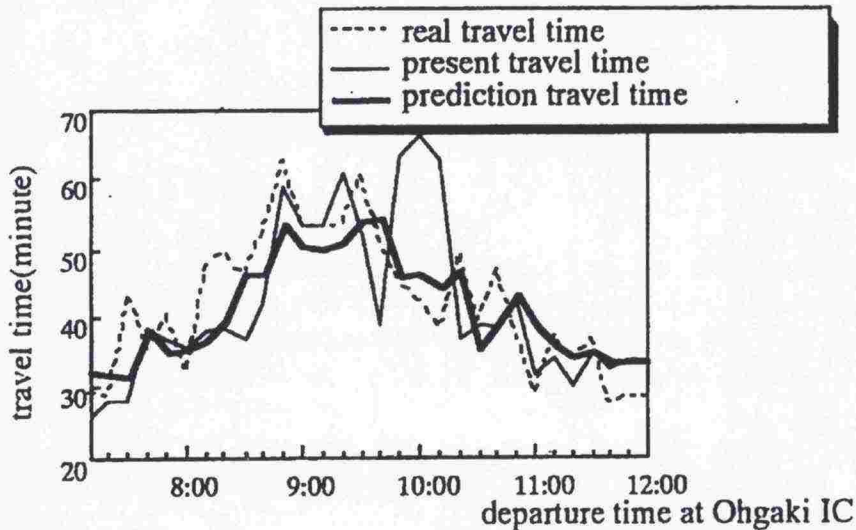
$$y^* = \frac{w_1 \text{mey}_1 + w_2 \text{mey}_2}{w_1 + w_2}$$



Kuva 16.

Säännön jos-osan ja sitten-osan rakenne neuroverkkoina sumeassa päättelyssä (Matsui & Fujita 1998).

Matsui & Fujita (1998) havaitsivat, että 3 000 opetuskierroksen jälkeen tuloksen tarkentumisen aste laskee. Kustannusten säästämiseksi mallin opettaminen päätettiin lopettaa tähän. Esimerkki mallin tekemien ennusteiden tarkkuudesta on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Todellinen matka-aika, sen hetken matka-aika, kun ajoneuvo on tiejakson alussa, sekä mallin ennustama matka-aika, kun on tehty 11 000 opetuskierrosta (Matsui & Fujita 1998).

4.3.5 Muita neuroverkkomalleja

Kwon & Stephanedes (1994) ovat rakentaneet neuroverkkomallin liikennemäärien ennustamiseen moottoritien poistumisrampeilla 5 minuutin jaksoissa. Mallia on tarkoitus käyttää automaattisen liikenteenohjauksen yhteydessä. Näin ohjauksessa voidaan toteuttaa ennustetulle liikenteelle optimaalista strategiaa eikä tarvitse tyytyä reaktiiviseen ohjaukseen.

Ennustemalli rakennettiin kolmikerroksisena vastavirta-algoritmiin perustuvana neuroverkkona. Mallissa oli syöte- ja tulostuskerrosten välissä yksi piilokerros. Mallia rakennettaessa oletettiin, että poistumisrampin liikennemäärä on riippuvainen sekä ylä- että alavirran liikenneolosuhteista. Malli opetettiin sekä tarkastelupäivän että aikaisempien päivien 5 minuutin liikennemäärädatalla, jolloin neuroverkko antoi vasteena halutun liikennemäärän. (Kwon & Stephanedes 1994.)

Kwon & Stephanedes (1994) vertasivat neuroverkkomallia olemassa olevaan UTCS-2-malliin, joka on erikseen kalibroitu kiinteäparametrinen, sekä aikaisemmista tiedoista koottua tietokantaa että nykyistä dataa käyttävä malli, ja mukautuvaparametriseen malliin, joka ennustaa liikennemäärät Kalman-suodattimen avulla. Jälkimmäinen vertailumalli koostuu kahdesta alamallista: ensimmäinen oli suunniteltu normaaleihin liikenneolosuhteisiin ja se käytti hyväkseen sekä tietokantaa että nykyistä dataa, malleista toinen oli suunniteltu poikkeuksellisiin tilanteisiin, joissa tietokannan tietoihin perustuva kysyntämalli erosi huomattavasti

tarkasteluhetkellä mitatusta, ja se käytti ainoastaan nykyistä dataa. Mallin parametrit oli sovitettu neuroverkon opetusdatan avulla.

Vertailussa mallien tekemille ennusteille laskettiin keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe. Vertailussa malleilla ennustettiin liikennemääriä kolmelta tavalliselta marraskuun arkipäivältä aamuruuhkan aikaan sekä kahdelta pyhäpäivältä neljälle eri rampille. UTCS-2-malli on jokaisessa vertailussa huonoin. Mukautuvaparametrinen malli ja neuroverkkomalli tekivät vuorotellen pienimmät virheet. Neuroverkon keskimääräinen absoluuttinen virhe ja keskineliövirhe olivat kuitenkin hieman pienempiä kuin mukautuvaparametrisella mallilla. (Kwon & Stephanedes 1994.)

Zhang ym. (1997) ovat myös kehittäneet neuroverkkoon perustuvan ennustemallin dynaamisten liikenteenohjausjärjestelmien tarpeisiin. Neuroverkko rakennettiin mallintamaan Papageorgioun laajentamaa Paynen kontinuumimallia, joka voidaan esittää seuraavasti.

$$v_j(k+1) = v_j(k) + \frac{T}{\tau} \{u_e[\rho_j(k)] - v_j(k)\} + \frac{T}{\Delta_j} v_j(k) [v_{j-1}(k) - v_j(k)] \\ - \frac{\mu T}{\tau \Delta_j} \frac{\rho_{j+1}(k) - \rho_j(k)}{\rho_j(k) + K} - \frac{\delta T}{\Delta_j} \frac{r_j(k) v_j(k)}{\lambda_j [\rho_j(k) + K]} - \eta \Phi \frac{\lambda_j - \lambda_{j+1}}{\lambda_j} \frac{\rho_j(k)}{\rho_{cr}} v_j^2(k)$$

Yhtälössä k on aikaindeksi, j indeksoi tiejaksoa, Δ on tiejakson pituus, λ on kais-tojen lukumäärä tiejaksolla, v on nopeus, ρ on liikennetiheys, r on rampille tulevien ajoneuvojen liikennemäärä, ρ_{cr} on kriittinen tiheys ja $T, \mu, \tau, \eta, \phi, \delta$ sekä K ovat vakioita.

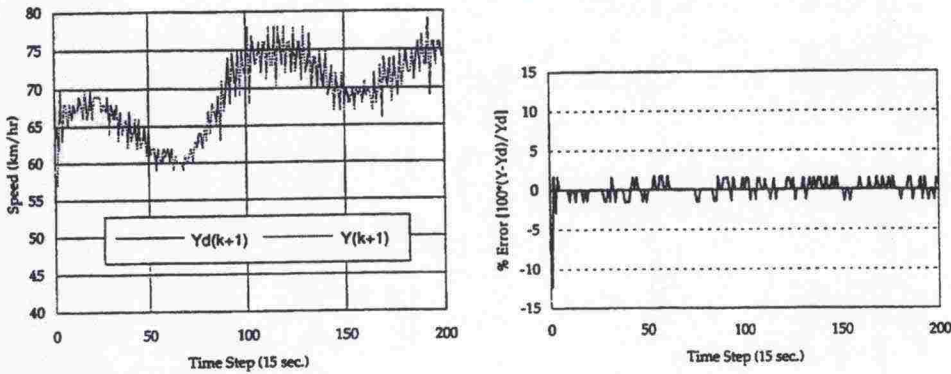
Ennustamiseen käytetty neuroverkko perustui vastavirta-algoritmiin ja se koostui syöte- ja tulostuskerrosten lisäksi kahdesta piilokerroksesta. Mallin syötteet ja vasteet valittiin käytetyn liikennemallin mukaisesti. Syöteinä olivat nopeus tarkasteltavalla tiejaksolla ja sitä edeltävällä tiejaksolla tarkasteluhetkellä, liikennetiheys tarkasteltavalla tiejaksolla ja sitä seuraavalla tiejaksolla tarkasteluhetkellä ja rampille tulevien ajoneuvojen liikennemäärä tarkasteluhetkellä, ja vasteena nopeus tarkasteltavalla tiejaksolla ennustehetkellä. Syötekerroksessa oli siis viisi neuronaa ja tulostuskerroksessa yksi. (Zhang ym. 1997.)

Mallia opetettaessa syötteet annettiin sekä liikenne- että neuroverkkomallille. Mallien antamia vasteita verrattiin ja erotus syötettiin takaisin neuroverkkoon, jolloin verkko korjasi painokertoimia ja kynnysarvoja omien oppimissääntöjensä mukaisesti. Näin neuroverkko oppi mallintamaan liikennettä valitun liikennemallin mukaisesti. Malli opetettiin simuloinnin avulla saadulla datalla. (Zhang ym. 1997.)

Yleensä neuroverkkojen vasteet skaalataan siten, että ne ovat joko välillä 0... 1 tai -1... 1. Koska liikenneparametreilla ei ole tarkasti määriteltäviä vaihteluvälejä ja tällaiset asettamalla voitaisiin aiheuttaa alkuperäisen liikennemallin vääristymisen, Zhang ym. (1997) päättivät jättää vasteet ja syötteet skaalaamatta.

Erilaisia piilokerroksen neuronien määriä kokeiltiin opetusprosessin aikana eikä verkon toiminnassa havaittu merkitseviä eroja, oli neuroneita sitten 5 + 5, 10 + 10 tai 20 + 20. Koska lisäneuronit kuitenkin pidentävät laskenta-aikaa, päädyttiin käyttämään viittä neuronaa molemmissa piilokerroksissa. (Zhang ym. 1997.)

Opetuskierroksia oli kaiken kaikkiaan 10 miljoonaa. Vaikka opettamiseen meni aikaa, opetettu verkko toimi nopeasti ja yhden tiejakson liikenteen simuloimiseen meni alle sekunti. Kuvassa 18 on esimerkki ennustemallin antamista tuloksista. (Zhang ym. 1997.)



Kuva 18. Esimerkki ennustemallin tekemästä nopeusennusteesta verrattuna käytetyn liikennemallin antamiin tuloksiin (vasemmalla) ja neuroverkkomallin tekemä virhe (oikealla) (Zhang ym. 1997).

5 Automaattisia liikenteenohjaus- ja liikennetietojärjestelmiä

5.1 Muuttuvat opasteet

Muuttuvilla opasteilla voidaan tienkäyttäjälle antaa tietoa, neuvoja tai ohjeita. Siitä, mitä kuljettajalle pitäisi kertoa häiriön tapahduttua tai edistääkö kuvan avulla selittäminen järjestelmän luotettavuutta, on monta erilaista filosofiaa. Selityksen sijaan annettu neuvo saattaa kuitenkin pienentää kuljettajien käyttäytymisen hajontaa, mikä on hyvä, koska ajoneuvojen nopeuksien välinen vaihtelu on merkittävä riskitekijä. Sen lisäksi, että kuljettajat saadaan käyttäytymään halutulla tavalla erilaisissa olosuhteissa (häiriöt, sumu, jää, ruuhka jne.), muuttuvia opasteita voidaan käyttää myös rajoittamaan kaistoille pääsyä nuolien ja rastien avulla. Opasteita voidaan näin ollen käyttää myös sellaisissa tapauksissa, joissa kaistat on varattu eri kellonaikoina eri suuntaan kulkevan liikenteen käyttöön. Maanteiden liikenteenohjaus- ja opastinjärjestelmiä käytetään yhä enenevässä määrin vilkkaasti liikennöidyillä kaupunkialueiden maanteilla. (Bell 1994.)

Tien yläpuolelle asennettujen muuttuvien opasteiden etuna on se, että kaikki tienkäyttäjät näkevät niiden antaman informaation. Opasteet edustavat kollektiivista dynaamista liikenteenohjausta. Muuttuvien opasteiden sisältämän informaation määrä on hyvin rajallinen, mikä johtuu sen ajan lyhydestä, jolloin tienkäyttäjä näkee opasteen. Kiinteät ilmaisimet (usein induktioilmaisimet) ohjaavat muuttuvia opasteita. Opasteiden täytyy kuitenkin saada tietoa myös alueilta, joille ajoneuvot ovat matkalla. (Sodeikat 1994.)

5.2 Sääohjauksinen tie (vt 7)

Valtatielle 7 on rakennettu liikenteenohjausjärjestelmä, jossa ohjaus perustuu keliin ja säähän. Ohjattu alue sijoittuu Kotkan ja Pyhtään välille, ja se on noin 36 kilometriä pitkä. Alueella on 97 muuttuvaa opastetta sekä 21 muuttuvaa varoitusmerkkien ja tiedotustaulujen yhdistelmää, joiden avulla tienkäyttäjää voidaan varoittaa vaarallisesta kelistä tai muista liikenteeseen vaikuttavista tekijöistä. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1995 ja 1997, Kauste ym. 1998.)

Koejakso sijaitsee alueella, jolla sää vaihtelee usein. Talvella lämpötila vaihtelee nollan molemmin puolin ja ilma on kosteaa. Milloin tahansa voi sataa joko vettä tai lunta. Säättä ja keliä tarkkaillaan kahdeksan automaattisen tiesääaseman avulla. Tiesääasemat mittaavat tuulen nopeuden ja suunnan, ilman, tienpinnan ja tierungon lämpötilan, ilmankosteuden sekä sateen intensiteetin ja määrän. Lisäksi tiesääasemaan kuuluu antureita, jotka mittaavat tienpinnan tilaa. Osa tiesääasemista mittaa myös näkyvyyttä. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1995 ja 1997, Kauste ym. 1998.)

Tiesääjärjestelmä ohjaa muuttuvia opasteita automaattisesti kulloisenkin kelitilanteen mukaan. Keskusyksikkö kokoaa tiesääasemien keräämät sää- ja kelitiedot sekä niihin liittyvät varoitustilatiedot viiden minuutin välein. Keskusyksikkö arvioi saatujen tietojen perusteella keliluokan ja määrittelee suositukset nopeusra-

joituksista ja muuttuvien varoitusmerkkien ja tiedotustaulujen yhdistelmissä esitettävistä tiedoista ja mahdollisista rajoituksista. Nopeusrajoitukset ja tiedotukset sekä mahdolliset varoitukset lähetetään ohjauslogiikkalaitteiston kautta muuttuville opasteille. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1995 ja 1997.)

Nopeusrajoitusvaihtoehtoja on keskitalvea lukuun ottamatta kolme, talvella niitä on kaksi. Normaali nopeusrajoitus on 120 km/h (talvella 100 km/h). Nopeusrajoituksia alennetaan tarpeen tullen joko 100, 80 tai 60 km/h:iin. Järjestelmä pyrkii riskin minimointiin ja käyttää näin ollen joskus vieläkin alhaisempia rajoituksia, jos tilanne niin vaatii. Opasteet antavat kuvien ja tekstin avulla tietoja olosuhteista. Nopeusrajoituksia on mahdollista alentaa manuaalisesti myös muista syistä, kuten esimerkiksi onnettomuuden takia. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1995 ja 1997.)

Tiesääjärjestelmässä automaattinen ohjausjärjestelmä luokittelee kelin tiesää- asemilta kerättyjen sää- ja kelitietojen perusteella. Keliluokkia on neljä (A, B, C ja D). Hyvällä kelillä (keliluokka A) kaikki seuraavat ehdot toteutuvat:

- tieanturin ilmoittama keli on kuiva tai kostea
- tiesääasema ei ilmoita kohtalaista tai runsasta sadetta
- tiesääasema ei ilmoita varoituksia
- tien rungon lämpötila ei ole yli yhtä astetta kylmempi kuin tienpinta, kun lämpötilat ovat alle 0 °C
- näkyvyysanturin ilmoittama näkyvyys on yli 300 metriä ja
- tuulianturin ilmoittama tuulen keskinopeus on alle 12 m/s.

Huonolla kelillä (keliluokka C) jokin seuraavista ehdoista täyttyy:

- tieanturi ilmoittaa, että tienpinnalla on lunta tai jäätä, ja tienpinnan lämpötila on alle +2 °C tai
- tieanturi ilmoittaa, että tienpinta on märkä, ja sadeanturi kertoo runsaasta sateesta tai
- tieanturi ilmoittaa, että tienpinta on märkä ja suolainen, ja sadeanturi kertoo runsaasta sateesta tai
- näkyvyysanturin ilmoittama näkyvyys on alle 200 metriä tai
- tuulianturin ilmoittama tuulen keskinopeus on suurempi tai yhtä suuri kuin 17 m/s.

Erittäin huonolla kelillä (keliluokka D) näkyvyysanturin ilmoittama näkyvyys on alle 100 metriä. Muut tilanteet kuuluvat tieluokkaan B. Eri tiejaksoille eri keliluokissa käytettävät nopeusrajoitukset on esitetty taulukossa 8. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997, Kauste ym. 1998.)

Taulukko 8. Tiejaksoilla eri keliluokissa käytettävät nopeusrajoitukset (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997, Kauste ym. 1998).

Keliluokka	Käytettävä nopeusrajoitus, (km/h) (suluissa edellisistä poikkeavat talviajan nopeusrajoitukset, km/h)						
	Pyhtään motellin liittymä	Siltakylä – Mokra	Mokran liittymä	Mokra - Karhula	Karhula - Kelta- kallio	Kelta- kallio - Summa	Summa - Poitsila
A Hyvä keli	60	100	80	100	100	120 (100)	100
B Normaali keli	60	80	80	100	100	100	100
C Huono keli	60	80	60	80	80	80	80
D Erittäin huono keli	60	60	60	60	80	80	80

Jos tiejaksoa ohjaavalta tiesääasemalta ei saada tietoa keskustietokoneelle tai keskuskoneelta ei saada 30 minuuttiin suositusta käytettävästä nopeusrajoituksesta, tiejakson muuttuvia nopeusrajoitusmerkkejä ohjataan normaalin kelin (keliluokka B) mukaisesti. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997.)

Muuttuvien opasteiden kokeilutulosuudella käytetään sään ja kelin mukaan muuttuvien varoitusmerkkien ja tiedotustaulujen yhdistelmiä, joilla voidaan varoittaa kelistä tai muusta liikennettä haittaavasta tekijästä. Yhdistelmiä ohjataan heikoimpien ohjausjaksolla havaittujen keliolosuhteiden mukaan. Muuttuva varoitusmerkki on normaalitilanteessa pimeänä, mutta tarvittaessa siinä voidaan näyttää muu vaara-, liukas ajorata- tai tietyömerkkiä. Muuttuvassa tiedotustaulussa voidaan näyttää esiohjelmoituja tekstiviestejä, jotka koostuvat kahdesta enintään kymmenen merkin pituisesta tekstirivistä. Muuttuvassa tiedotustaulussa näytetään yleensä ilman ja tienpinnan lämpötilat. Mikäli nopeusrajoitus on alennettu vuodenaikaan nähden korkeimmasta käytettävästä nopeusrajoituksesta, rajoituksen alentamisen syy kerrotaan tiedotustaulussa, kun keli on huono (keliluokka C) tai erittäin huono (keliluokka D). Normaali-tilalla (keliluokka B) varoitusmerkkiä käytetään ilman nopeusrajoituksen alentamista, jos varoitus annetaan kuuran takia tai näkyvyys on 300 - 200 metriä. Moottoritiejaksoilla varoitusmerkkiä voidaan käyttää ilman nopeusrajoituksen alentamista myös silloin, kun vain vasemman kaistan antureilta saadaan varoitus lumen tai jään takia. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997.)

Yksittäiset nopeusrajoitusmerkit on kytketty toiminnallisiin merkkiryhmiin. Samaa merkkiryhmään kuuluvissa merkeissä näytetään samansuuruista nopeusrajoitusta. Yksiajorataisella väylällä on lisäksi yhdistetty eri ajosuuntien merkkiryhmiä, jolloin molempiin ajosuuntiin näytetään samansuuruista nopeusrajoitusta lukuun ottamatta pistekohtaisia nopeusrajoituksia (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997). Sääohjauksisella tiellä on lisäksi kokeiltu neuroverkkoihin perustuvaa ohjausalgoritmia (Raitio 1998).

5.3 Länsiväylä

Länsiväylän ruuhkavaroitusta- ja kameravalvontajärjestelmä on toiminut vuodesta 1996. Järjestelmän ensimmäisessä vaiheessa tiellä on 14 muuttuvaa liikennemerkkiä, lähes sata induktioilmaisinta, jotka on asennettu 17 poikkileikkaukseen, kolme seurantakameraa ja tiedonsiirtojärjestelmä (Uudenmaan tiepiiri 1999). Muuttuvissa liikennemerkeissä on nopeakasutus- ja varoitusmerkit. Varoitusmerkeissä tienkäyttäjää voidaan varoittaa ruuhkasta, liukkaudesta tai tietyöstä.

Järjestelmän tarkoitus on parantaa liikenneturvallisuutta ja samalla sujuvuutta. Se pyrkii tasoittamaan nopeuksia alentamalla nopeakasutuksen vastaamaan ilmaisimilla havaittua nopeakasutusta. Ruuhkavaroitustajärjestelmä pyrkii informoimaan tienkäyttäjää ruuhkan alkamisesta tai jatkumisesta ja kertomaan jonon päänsijainnin. Samalla nopeakasutukset suhteuttavat liikennevirran nopeuden kulloiseenkin liikennetilanteeseen. (Uudenmaan tiepiiri 1999.)

Merkkien kunkin näyttötilan seurantaan varten on asetettu kolme raja-arvoa: näyttötilan minimikesto, yläraja epätavallisen lyhytaikaiselle ohjaukselle ja alaraja epätavallisen pitkäaikaiselle ohjaukselle. Ohjauksella tarkoitetaan aikaa, jonka näyttötila on ollut päällä. Jonovaroituksen näyttöä ja nopeakasutuksen muuttamista ohjataan ohjelmalla, joka perustuu kiinteisiin kynnyksarvoihin ja eräänlaisen nopeussuuren arvon seurantaan. Nopeussuure määritellään seuraavasti.

$$v(k) = \alpha \cdot v(v) + (1 - \alpha) \cdot v(k - 1)$$

Yhtälössä $v(k)$ on nopeussuure, kun k ajoneuvosta on saatu nopeakasutus, α on viimeisimmän ajoneuvon vaikutusosuus prosentteina, $v(v)$ on viimeisimmän ajoneuvon nopeus ja $v(k - 1)$ on edellinen nopeussuure. Nopeussuure mitataan ilmaisinkohtaisesti ja jokainen yksittäinen ilmaisu vaikuttaa arvoon. Mittauspisteen nopeussuureksi lasketaan kultakin minuutilta ilmaisinkohtaisten nopeussuureiden aritmeettinen keskiarvo. Rinnakkaismerkeissä näytetään aina samaa näyttöä. (Innana 1997.)

Ruuhkaohjaus on ollut käytössä keskimäärin neljä kertaa viikossa. Ohjauksen keskimääräinen kesto on ollut 21 minuuttia. (Uudenmaan tiepiiri 1999.)

Liikennekeskuksen mielestä järjestelmä on toiminut suunnitellusti. Järjestelmää käyttöön otettaessa joitain ohjausparametrejä piti säätää, mutta tämän jälkeen järjestelmä on toiminut moitteettomasti. Ongelmia ovat aiheuttaneet ainoastaan ilmaisinsilmukoissa ja järjestelmän sisäisessä tiedonsiirrossa esiintyneet viat. Myös ukkonen on aiheuttanut toimintahäiriöitä. (Uudenmaan tiepiiri 1999.)

5.4 Liikennetietojärjestelmä E18:lla Norjassa

E18-tielle on Norjassa, Vestfoldin maakunnassa rakennettu liikennetietojärjestelmä. E18:lla on tällä alueella kesäaikaan huomattavia välityskykyongelmia, jotka johtuvat lomaliikenteen suuresta määrästä kaksikaistaisella tiellä. Kun ruuhkaa ilmenee, tienkäyttäjää informoidaan ja liikennemerkit osoittavat vaihtoehtoiset reitit, joille tienkäyttäjät voivat halutessaan siirtyä. (Luku 5.4 perustuu viitteeseen Giæver (1996).)

E18:lla on vuosia kerätty liikennemäärä- ja nopeustietoja. Vuoteen 1994 saakka mittauspisteitä oli neljä. Kesällä 1994 tielle asennettiin vanhan järjestelmän rinnalle uusi järjestelmä, joka mittaa matka-aikoja ja muita linkkiparametrejä. Uudessa järjestelmässä käytetään automaattista ajoneuvon tunnistusta tunnistamaan samat ajoneuvot eri mittauspisteissä. Päinvastoin kuin aikaisemmissa menetelmissä matka-ajat ja viivytykset saadaan nyt mitattua suoraan, mikä parantaa huomattavasti kulloisenkin liikennetilanteen arviointia. Vuonna 1995 linkkidatan mittaamista varten asennettiin toinenkin järjestelmä. Järjestelmät on kuvattu alla.

Pistedataa kerätään neljässä pisteessä E18:lla. Kun liikennettä on paljon, liikennetiedot välittyvät liikennekeskukseen viiden minuutin välein ja muulloin tunnin välein. Liikennetiedot kerätään Scan Maticin laitteilla (Golden River) ja induktioilmaisimilla. Matka-ajat ja viivytykset mitataan kolmelta tiejaksoilta E18:lla. Linkkidatan mittaukseen on siis kaksi erilaista järjestelmää: toinen perustuu Q-free-tunnistimiin (tietullia varten autoihin asennettuihin sähköisiin ilmaisimiin) ja toinen Datarec40:een ja pietsosähköisiin kaapeleihin, joiden avulla määritetään ajoneuvojen fyysisiä ominaisuuksia.

Q-free-järjestelmässä kustakin ajoneuvosta tallennetaan tulliaseman numero, ohitusaika ja tunnistinnumero. Näiden tietojen perusteella kaikille kahdella tietulliasemalla tunnistetuille ajoneuvoille lasketaan matka-aika, viivytyks ja matkanopeus. Ajoneuvoja, jotka ovat tehneet pysähdyksiä, ei hyväksytä mittauksiin. Ohjelmiston graafinen osa esittää tulokset diagrammeina. Järjestelmällä on joitain puutteita. Tunnistinnumeron täydelliseen rekisteröimiseen tarvitaan lupa ja toisaalta tunnistimella varustettujen autojen osuus vaihtelee alueittain. Lupien välttämiseksi päätettiin rekisteröidä ainoastaan kuusinumeroisen tunnistinnumeron kolme viimeistä merkkiä. Tämä johti kuitenkin siihen, ettei absoluuttinen tunnistaminen ollut enää mahdollista. Kun järjestelmä laitetaan päälle ennen kuin ruuhkaa ilmenee, peräkkäisten ajoneuvojen matka-ajat ovat suunnilleen yhtä suuria ja kolmen merkin avulla tapahtuva tunnistaminen vaikuttaa riittävältä.

Bilfunn (Bil = ajoneuvo, funn = löytäminen) taas on järjestelmä, joka laskee linkkikohtaisia liikennetietoja syötetietoinaan Datarec410:n antamat tiedot ajoneuvojen ohitusajoista, pistenopeuksista, akseleiden lukumääristä, akselipohjista ja -painoista. Menetelmä takaa tienkäyttäjän anonymiteetin, koska se ei perustu yksittäisten ajoneuvojen absoluuttiseen tunnistamiseen. Koska akselipohjissa ja -painoissa on ajoneuvojen välillä vain vähän vaihtelua, ajoneuvoja ei ole helppo tunnistaa. Tästä syystä parhaat tulokset saadaan silloin, kun liikennemäärä on pieni tai kun keskimääräisestä ajoneuvosta poikkeavien ajoneuvojen osuus liikennevirrassa on suuri. E18:n tilanne on suuresta liikennemäärästä ja henkilöautojen suuresta osuudesta johtuen usein hankala. Bilfunn antaa tuloksena matkajan, viivytyksen ja matkanopeuden.

E18:lle asennettiin jo niinkin aikaisin kuin vuonna 1988 tienkäyttäjille liikenneolosuhteista tiedottava järjestelmä. Menetelmä perustui liikennemäärä- ja nopeustietoihin, joita kerättiin tietyissä tienkohdissa. Parametrien kehitystä tarkkailtiin liikennekeskuksessa ja, jos ruuhkaa ilmeni, muuttuvilla opasteilla kerrottiin mahdollisista viivytyksistä ja vaihtoehtoisista reiteistä. Muuttuvia opasteita käytetään yhä. Opasteiden viestivaihtoehdot ovat: "mahdollisesti ruuhkaa", "pitkiä viivytyksiä" ja "onnettomuus E18:lla". Samalla kun jotain edellä mainituista viesteistä

näytetään, annetaan tietoa vaihtoehtoisista reiteistä. Normaalissa liikenteessä opasteet näyttävät tyhjää.

Kesällä 1994 ryhdyttiin mittaamaan myös matka-aikoja ja viivytyksiä, mikä mahdollisti tienkäyttäjille kerrottujen liikennetietojen tarkentumisen. Nykyään tienkäyttäjiiä informoidaan todellisista viivytyksistä E18:lla. Opasteissa ilmoitetaan myös se, ovatko viivytykset kasvamassa vai laskemassa. Opaste kertoo odotetun viivytyksen opastaululta joko Sandeen tai Drammeniin. Opastauluja ohjaillaan liikennekeskuksesta käsin.

Tähän asti strategiana on ollut olla ilmoittamasta ruuhkista tai viivytyksistä ennen kuin niitä ilmenee. Näin jotkut tienkäyttäjät saattavat kuitenkin kokea ruuhkaa ja viivytyksiä ennen kuin opasteet ilmoittavat siitä. Pistedataan perustuen liikennevirta on määritelty epävakaksi silloin, kun keskimääräinen pistenopeus on alhaisempi kuin 40 km/h kolmen peräkkäisen viisiminuuttisen aikana ja liikennemäärä on suuri. Epävakaksi määritelty ajanjakso voi kuitenkin pitää sisällään myös sellaisia viisiminuuttisia, joiden aikana keskimääräinen pistenopeus on 40 - 50 km/h.

Alusta lähtien tarkoituksena on ollut saada järjestelmä täysin automaattiseksi. Myöhemmin kuitenkin huomattiin, että osittainen käsin ohjaaminen paransi tuloksia, koska kokemuksensa lisäksi operaattoreilla on lisäinformaatiota, jota he saavat videokameroiden, muiden mittauspisteiden, poliisin ym. kautta ja joka auttaa ohjaustoimenpiteistä päättämistä.

Operaattorin pitäisi pystyä ennustamaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, kuinka epävakaa liikennevirta tulee kehittymään, kun sellainen on havaittu jossain mittauspisteessä. Liikennetilanteet eivät kuitenkaan aina kehity samalla tavalla. Tämän takia tarvitaan jatkuvasti kelitietoja sekä tietoja muista liikennekeskuksista ja muista mittauspisteistä ongelma-alueen ulkopuolelta.

Käytännössä "mahdollisesti ruuhkaa" -viestiä näytetään, kun jossakin mittauspisteessä tehdään havaintoja epävakasta liikennevirrasta. Kun epävakaa liikennevirta havaitaan yhtä aikaa kahdessa tai useammassa mittauspisteessä, näytetään "pitkiä viivytyksiä" -viestiä. Opastintaulut säädetään taas näyttämään tyhjää, kun liikennevirta on palautunut vakaaksi ja liikennemäärä lähtee laskuun. (Gjæver 1996.)

Toistaiseksi linkkidataan perustuvista kriteereistä ei ole vielä päätetty. Syynä tähän on vaikeus päättää "hyväksyttävistä" viivytyksistä. Toisaalta järjestelmää on vasta testattu: sen antamien tuloksien tarkkuutta ja järjestelmän luotettavuutta on tutkittu. Päättäessään sopivasta ohjaustoimenpiteestä operaattori käyttää siis sekä piste- että linkkidataa hyväkseen. Tavoitteena on kuitenkin perustaa ohjaustoimenpiteet pelkkään linkkidataan.

Käytännössä matka-aika, matkanopeus ja viivytys määritellään tällä hetkellä niiltä ajoneuvoilta, jotka ovat juuri poistumassa tiejaksolta. Parempi olisi arvioida vastaavat parametrit niille ajoneuvoille, jotka ovat juuri tulossa tiejaksolle. Se, mihin parametreihin estimaatit pitäisi perustaa, ei ole vielä selvää. Useita erilaisia ehdotuksia on tehty. Eräs mahdollisuus on käyttää hyödyksi mittauspisteiden mittaamien liikennemäärien ja nopeuksien perusteella laskettuja liikennetiheyksiä tien eri osilla. Liikennetiheyden kehitystä voitaisiin simuloida liikennevirtateorian avulla. Toinen vaihtoehto on arvioida matkanopeuden kehitys pistenopeuk-

sien avulla. Ylä- ja alavirran pistenopeuksien ja liikennemäärien avulla voitaisiin myös ehkä rakentaa yksinkertainen ennustemalli. Bilfunniin pitäisi kehittää kehittyneempi algoritmi, joka toimisi hyvin myös suurilla liikennemäärillä ja henkilöautojen osuuden ollessa suuri.

5.5 Muita eurooppalaisia järjestelmiä

5.5.1 Amsterdamin kehätie

Amsterdamin ympäristössä on usein liikenneongelmia. Amsterdamin kehätiellä kulkee vuorokaudessa 150 000 ajoneuvoa ja sille onkin rakennettu automaattinen liikenteenohjausjärjestelmä. Järjestelmä koostuu muuttuvista nopeusrajoituksista ja kaistaohjausmerkeistä. Järjestelmä ilmoittaa muutaman sekunnin sisällä takana tulevia autoja automaattisesti edessä olevasta hitaammasta liikennevirrasta ja sulkee kaistoja häiriötilanteissa ja tietöiden aikana. Järjestelmä on todettu luotettavaksi ja sen on havaittu vähentävän onnettomuuksia huomattavasti. Koska onnettomuuksia on vähemmän, moottoritie toimii huomattavasti entistä paremmin. (Luku 5.5.1 perustuu viitteeseen Buijn ym. (1994).)

Kehätiellä on toiminut myös ramppiohjausjärjestelmä vuodesta 1989 alkaen erään tunnelin luona. Ramppiohjauksen on todettu vähentävän ruuhkaa ja kehätien nopeudet ovat nousseet entisestä 25 km/h:stä 70 km/h:iin. Tien välityskyky ei ole kuitenkaan parantunut.

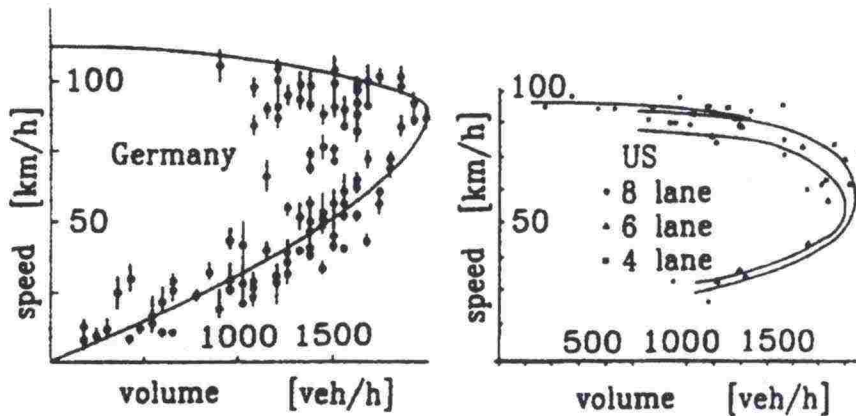
Kehätien liikenteenohjausjärjestelmän vuoksi tielle on asennettu ilmaisimia noin 500 - 700 metrin välein. Näiden mittausasemien välityksellä saadaan tieto liikennemääristä ja ajoneuvojen nopeuksista. Useampi ohjausjärjestelmä käyttää hyväkseen samaa liikennedataa. Tavoitteena on saada alueelle täydellinen monitorintijärjestelmä vuonna 2000.

Kehätielle on asennettu myös reitti-informaatiojärjestelmä. Järjestelmä koostui aluksi yhdestä muuttuvasta opasteesta, joka kertoi jonon pituuksista kahden tunnelin luona. Informaatio koettiin erittäin hyödylliseksi ja vaikka vain pieni osa autoilijoista muutti reittiään, vaikutus kehätien liikenteen sujuvuuteen oli huomattava. Positiivisten kokemusten rohkaisemina jokaiselle sisään tulotielle asennettiin vuonna 1994 muuttuvat, ruuhkasta kertovat opasteet. Uusien opasteiden uskotaan vähentävän ruuhkaa entisestään, koska nyt autoilijoita voidaan varoittaa ruuhkasta useammalla sisään tuloreitillä. Uusille opasteille kehitettiin uudet koko kehätien jonoista kertovat algoritmit. Kehä on jaettu ilmansuuntien mukaan neljään osaan, joiden mukaan ruuhkatilanteesta kerrotaan.

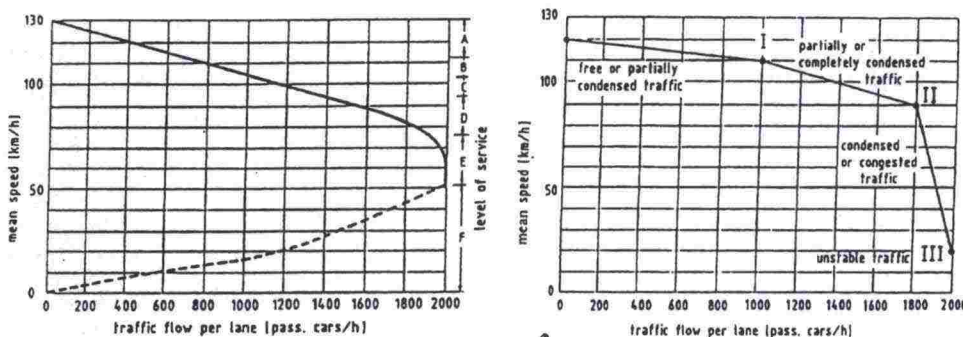
5.5.2 Saksalainen liikenteenohjausstrategia

Tässä esitetty liikenteenohjausstrategia perustuu toiminnalliseen palvelutasoon, joka on johdettu idealisoidusta nopeus-liikennemääräkuvaajasta ja kenttämitauksista, jotka on esitetty *kuvassa 19*. Näiden mittauksien perusteella palvelutasojen määrä on laskettu kolmeen, jotka ovat vapaa, lähes vapaa ja epävakaa liikennevirta. Kuvaajat ovat HCM1985:stä ja ne on muokattu vastaamaan Länsi-

Saksan moottoriteitä (kuva 20). (Luku 5.5.2 perustuu viitteisiin Kühne (1991a) ja (1991b).)



Kuva 19. Nopeus-liikennemääräkuvaaja saksalaiseen (vasemmalla) ja yhdysvaltalaiseen (oikealla) dataan sovitettuna (Kühne 1991a, 1991b).

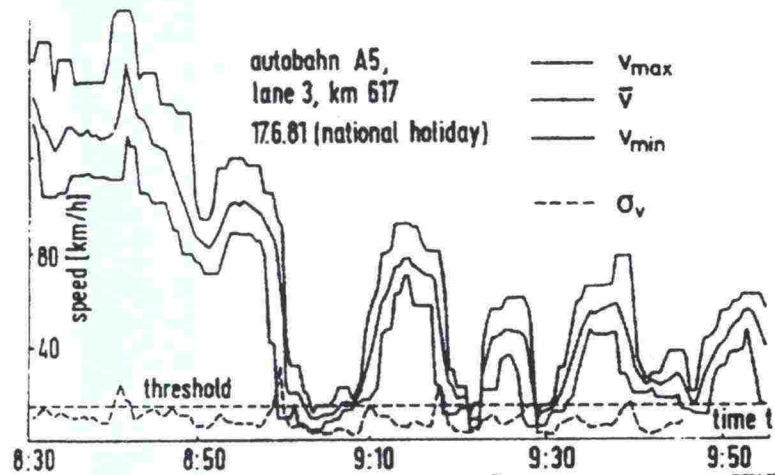


Kuva 20. Tien välityskyky ja palvelutaso -muutokset HCM:stä Länsi-Saksan olosuhteisiin (vasemmalla) ja yksinkertaisen polynomi-approksimaatio (oikealla), jota käytetään liikenteenohjauksessa (Kühne 1991a, 1991b).

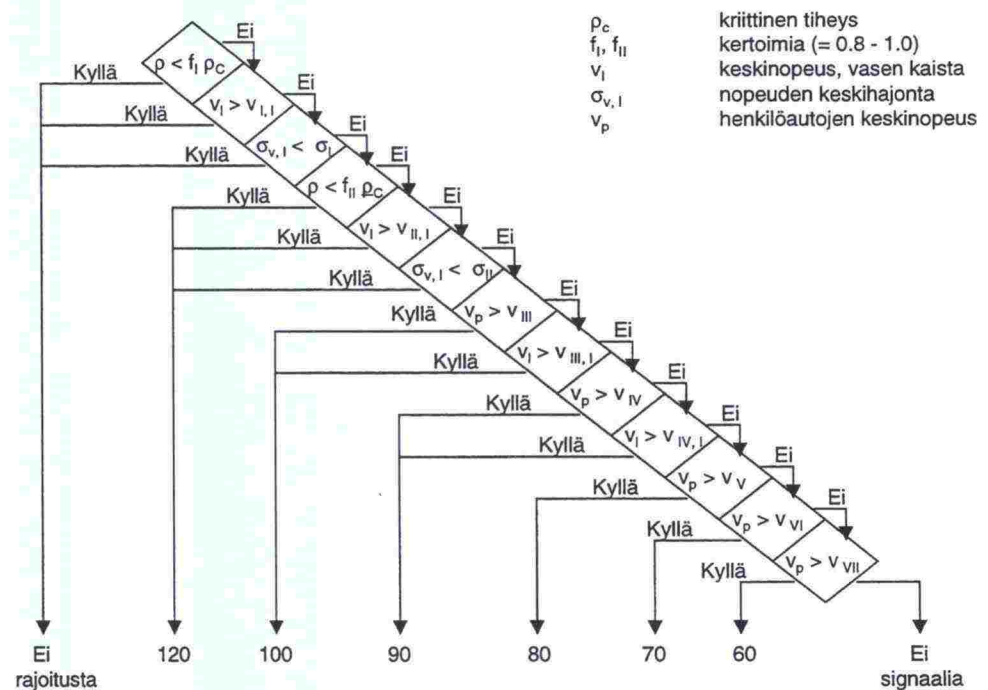
Liikennevirtamalli, joka on esitelty viitteissä, mahdollistaa dynaamisen liikennetilanteen luokittelun ja antaa sopivan kriteerin aikaiselle varoitukselle ruuhkautumisesta. Koska liikennevirtamalli käsittelee liikennevirtaa nesteanalogian mukaisesti, voidaan olettaa, että muutosta vakaasta liikennevirrasta ruuhkautumiseen, pysähtelevään virtaan kuvaavat suuret heilahtelut. Nestevirtausanalogia osoittaa syyn mittaus tulosten suurelle hajonnalle liikennevirran epävakaalla alueella. Liikennevirran nopeusjakauman hajonta siis kasvaa ennen kuin liikenne pysähtyy lopullisesti. Nopeusjakauman suurta keskihajontaa voidaan täten pitää ensivaroituksena ruuhkautuvasta ja turbulentista liikennevirrasta.

Kuvassa 21 on esitetty nopeusjakauma ja nopeuden keskihajonta liikenteelle, jossa on tapahtunut useita pahoja ruuhkautumisia. Esimerkki on moottoritietä A5 läheltä Karlsruhea. Jokaisessa esimerkin ruuhkakohdassa nopeuden keskihajonta ylitti arvon 18 km/h ennen kuin keskinopeus lähti laskemaan. Tämä vahvistaa sen, että ensimmäinen varoitus ruuhkasta saadaan tarkkailemalla nopeuden jakauman laajenemista. Tämän varoitusstrategian pohjalta johdettiin ohjaus-

logiikka, joka on esitetty kuvassa 22. Baijerin pohjoinen liikenteenohjausalue on ottanut ohjausstrategian käyttöönsä.



Kuva 21. Nopeusjakauma, keskihajonta ja aikaisen varoituksen periaate (Kühne 1991a, 1991b).



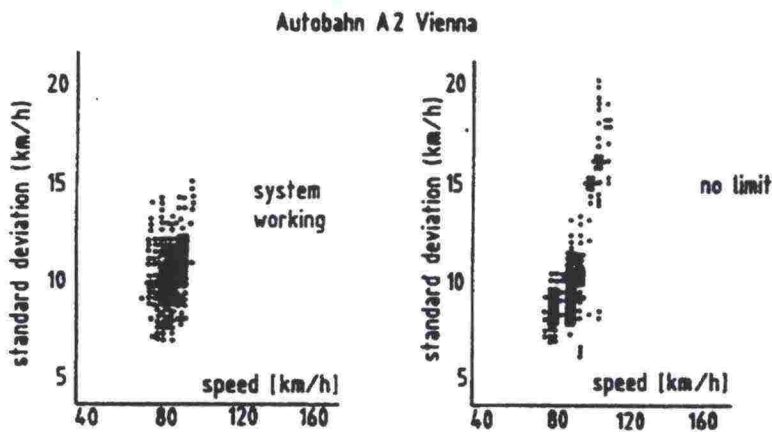
Kuva 22. Ohjausstrategia, joka on johdettu nopeusjakaumaan perustuvasta ruuhkavaroituksesta (Kühne 1991a, 1991b).

Kuvassa 22 esitetty ohjausstrategian vuokaavio pitää sisällään useita raja-arvoja. Päätös nopeusrajoituksen muuttamisesta tehdään liikennetiheyden perusteella. Liikennevirtamallin mukaisesti liikennetiheys kuvaa kokonaisen tiejakson liikennetilannetta, toisin kuin paikkaan sidotut muuttujat (liikennemäärä tai keskinopeus).

Vertailuarvoksi valitaan kaista, jolla raskaiden ajoneuvojen osuus on pieni. Keskinopeus otetaan vertailuun lisäparametriksi. Koska raskaan liikenteen laskettu ja mitattu liikennetiheys osoittavat suuria vaihteluita, varmemman päätöksen tekemiseen tarvitaan lisäkriteerejä. Kolmantena muuttujana päätöksenteossa on nopeusjakauman keskihajonta, joka kuvaa liikennevirran epätasaisuutta. Mitä enemmän raskasta liikennettä sitä suurempi on liikenteen ruuhkautumisen vaara. Nopeusjakauman laajuutta lukemalla voidaan siis saada ennakkovaroitus syntyvästä ruuhkasta. Tätä kriteeriä käytetäänkin tämän takia melko korkealla nopeustasolla.

Vuokaavio on suunniteltu kuudelle eri nopeusrajoitukselle ja kahdelle neutraalille tilalle: ei nopeusrajoitusta, 120, 100, 90, 80, 70 ja 60 km/h sekä liikenneruuhka. Päätöskriteerit ovat kiinteät ja ne on tehty käytännön näkökulmasta. Monimutkaisen tavoitefunktion käyttäminen dynaamisessa päätöslogiikassa ei ole järkevää.

Ohjausstrategia, joka perustuu nopeusrajoituksiin ja kaistaohjaamiseen, tasoittaa liikennevirtaa, ehkäisee kriittisiä liikenteenvaihteluita ja vakauttaa liikennevirran tilanteissa, joissa liikenne muutoin pysähtyisi. Tästä on esitetty esimerkki kuvassa 23, jossa kahden minuutin nopeusjakauman keskihajonta on esitetty keskinopeuden funktiona silloin, kun kaistaohjausjärjestelmä on ollut käytössä ja kun se on ollut pois päältä. Kuvasta voidaan huomata, että järjestelmä tasoittaa huomattavasti liikennevirran vaihteluita.



Kuva 23. Nopeusjakauman keskihajonta keskinopeuden funktiona, kun kaistaohjaus on ollut päällä (vasemmalla) ja ilman sitä (oikealla) (Kühne 1991a, 1991b).

Nopeusjakauman ominaisuudet ovat osoittautuneet erinomaiseksi työkaluksi liikenteenohjaustoimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa ja varhaisena ruuhkavaroituksena. Sen varmistamiseksi, että nopeusjakaumaa on päivitetty riittävästi ja että otos on riittävän stationaarinen, on käytetty Sturgesin nyrkkisääntöä. Nyrkkisääntöä käytetään nopeusluokan leveyden arvioimiseen. Jotta nopeudet saadaan jaettua riittävän moneen luokkaan, nyrkkisääntö määrittelee nopeusluokan leveyden seuraavalla tavalla.

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{ld(2q_m t)}$$

Yhtälössä ld on kaksikantainen logaritmi, q_m on keskiliikennemäärä ja t on tarkastelujakson pituus. Kahden minuutin nopeusdatalle, kun maksimi liikennemäärä on 2 000 ajon./h, nopeusluokan leveydeksi saadaan 10 km/h. Tiheämpi jakaminen ei kannata voimakkaiden vaihteluiden takia ja suurempi jakoväli taas hukkaa turhaan osan informaatiosta. Nopeuden mittaukset täytyy siis tehdä vähintään 5 km/h tarkkuudella.

5.5.3 Perugian moottoritie Italiassa

Perugian moottoritie Italiassa on nelikaistainen moottoritie, jossa on kuusi poistumisramppia. Tien pituus on noin 11 km ja se koostuu paljolti tunneleista ja silloista. Tien liikennemäärä on ruuhka-aikaan noin 3 000 ajon./h suuntaansa. Ajoneuvoista 25 prosenttia on raskaita ajoneuvoja. Liikenneturvallisuuden parantamiseksi tielle asennettiin automatisoitu liikenteenohjausjärjestelmä. (Luku 5.5.3 perustuu viitteeseen Filippi ym. (1989).)

Järjestelmän tehtävänä on kerätä dataa ja muokata sitä, esittää liikennetiedot järjestelmän käyttäjille ja ohjata liikennettä. Liikenteenohjaustoimenpiteet ovat osittain automaattisia. Järjestelmä on rakennettu siten, että sen käyttäjä voi puuttua ohjaukseen monimutkaisissa tilanteissa.

Automaattinen datankeräys kattaa useita liikennevirtaa kuvaavia parametrejä: liikennemäärät sekä sen, onko liittymis- ja poistumisrampeilla hitaasti liikkuvia tai pysähtyneitä autojonoja. Ilmaisinjärjestelmä antaa tietoja liikennemääristä ja vaurasteista. Myös keli- ja säätietoja kerätään automaattisesti sumun, sateen, lumen ja jään aiheuttamien ongelmien ennaltaehkäisemiseksi. Datan keräyksen ohella suoritetaan myös seuraavat laskutoimenpiteet: liikennemäärä-välityskyky-suhteen laskeminen tunneleille ja valaistuksen tehokkuuden laskeminen. Ei täysin automaattisena osana datankeräämisessä on hätäpuhelimista tuleva informaatio. Nämä tiedot yhdistetään tiedonkäsittelyyn liikennekeskuksessa. Automaattisesti kerättyä dataa täydennetään myös syöttämällä järjestelmään käsin tietoja infrastruktuurin käytöstä ja ylläpidosta sekä liikennemääristä vaihtoehtoisilla reiteillä. Automaattista datankeräystä tukee kamerajärjestelmä, jonka avulla liikennekeskuksen henkilökunta voi liikennekeskuksesta käsin tarkastella liikennetilanteita koko ohjatulla alueella.

Keskitetysti koottu data käsitellään automaattisesti. Tämän jälkeen järjestelmä määrittelee tarvittavat liikenteenohjaustoimenpiteet, esittelee tilanteen operaattorille ja mahdollisesti tallentaa datan tilastollisia tarkoituksia varten tai myöhemmin analysoitavaksi. Eräs tärkeä toiminto dataa prosessoivassa järjestelmässä on onnettomuuksien automaattinen monitorointi ja tunnistaminen. Tämä tapahtuu vertailemalla kahden peräkkäisen tiejakson liikennetiheyksiä.

Liikenteenohjaustoimenpiteet kattavat liikenteen itse moottoritiellä, sen poistumisrampeilla ja lähestyvillä teillä. Moottoritielle tulevan liikenteen ohjaus perustuu rampeille tulevien ajoneuvojen määrän mittaamiseen. Pyrkimyksenä on pitää ajoneuvojen määrä moottoritiellä kohtuullisena liikenteen sujuvuus ja turvallisuus sekä ympäröivien teiden liikennetilanne huomioon ottaen. Liikennettä rajoitetaan liikennevaloilla. Tämän lisäksi tienkäyttäjille annetaan informaatiota muuttuvien opasteiden avulla.

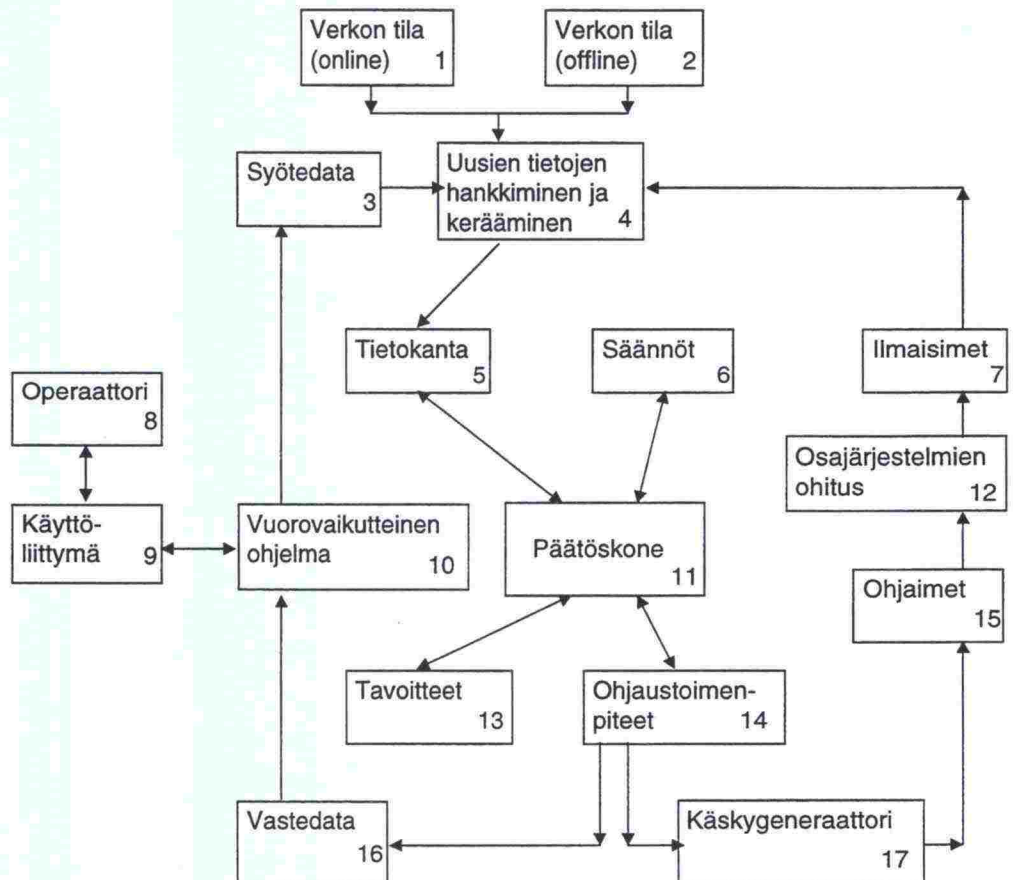
Liikenteenohjaus jaetaan kolmeen osaan: nopeusrajoituksiin, ennakkovaroituksiin edellä olevasta liikennetilanteesta ja liittymisramppien määrän rajoittamiseen. Näitä ohjaustoimenpiteitä täydennetään tarjoamalla liikenneinformaatiota: tunneleissa viestejä annetaan kovaäänisten kautta, muuten tiedonantoina radion ja television kautta, viestejä välitetään myös autoyhdistykselle ja liikennepoliisille sekä välitetään tienkäyttäjille televisiomonitorien välityksellä.

Perugian moottoritieltä puuttuu leveä piennar, mikä kasvattaa riskejä ja tekee väliintulot vaikeammiksi. Järjestelmän tarkoituksena onkin keskittyä selviytymään hätätapauksista mahdollisimman nopeasti. Hätätapaukset on koodattu vakavuutensa mukaan. Ennakkovaroitustilanteet ovat tietöitä, savua kaistoilla, hankalia sääolosuhteita, ajoneuvojen hajoamisia ja hidastuvaa liikennettä. Tällaisissa tapauksissa ohjaus rajoittuu tilanteesta varoittaviin viesteihin muuttuvissa opasteissa ja nopeusrajoituksiin.

Ennakkohätätilanteet syntyvät, kun nopeus alittaa ja liikennetiheys ylittää tietyt raja-arvot moottoritiellä. Tällaisissa tapauksissa edellä mainittujen ohjaustoimenpiteiden lisäksi moottoritielle tulevan liikenteen määrää rajoitetaan. Onnettomuuden aiheuttama liikennetukos yhdellä tai useammalla kaistalla on määritelty onnettomuushätätilanteeksi ja, jos onnettomuuteen on joutunut vaarallisia kemikalleja kuljettava ajoneuvo, kemikaalihätätilanteeksi.

Liikenteenohjausjärjestelmää ja hätätilanteita varten tarvitaan ohjelmisto, joka kykenee tekemään nopeita ja tehokkaita päätöksiä. Tähän tehtävään on valittu asiantuntijajärjestelmä, joka ratkaisee ongelmat matemaattisten mallien ja heuristiikan avulla. Järjestelmä havainnoi verkon liikennettä tietyn funktion avulla, arvioi liikennetilanteen aikaisemman informaation avulla, sekä ehdottaa ja toteuttaa liikenteenohjaustoimenpiteitä.

Asiantuntijajärjestelmä koostuu liikenneinformaatiotietokannasta, joukosta lopullisia tavoitteita, säännöistä, jotka määrittelevät ohjaustoimenpiteiden seuraukset tavoitteiden saavuttamiseksi, laitteesta, joka yhdistää edellä mainitut komponentit, ja vuorovaikutteisesta ohjelmasta, joka kommunikoi operaattorin kanssa. Kuva 24 esittää Perugian moottoritien asiantuntijajärjestelmän rakennetta. Järjestelmä on jaettu kolmeen prosessiin: keräämis-, päätös- ja vuorovaikutusprosessiin. Keräämisprosessi varmistaa liikennetilanteen usealla eri tavalla: (laatikko 1) suoraan ilmaisimista tulevan datan, operaattorin tarjoamien erillisten tietojen (liikenne-ennusteita tietyille tapahtumille, tietöille jne.) (laatikko 2), vuorovaikutteisen prosessin syötetietojen (laatikko 3) ja ohjauslaitteiden (liikennevalot, muuttuvat opasteet jne.) saamien ilmaisintietojen (laatikko 7) perusteella.



Kuva 24. Perugian moottoritien liikenteenohjaus- ja informaatiojärjestelmään kuuluvan asiantuntijajärjestelmän rakenne (Filippi ym. 1989).

Jos järjestelmä havaitsee jotain epänormaalia, aktivoidaan päätösprosessi, joka muokkaa vastaanotetusta datasta koostuvaa tietokantaa (laatikko 5). Tietokanta sisältää staattisia tietoja liikenneverkosta sekä dynaamista informaatiota, joka kuvaa liikennevirtaa, nopeutta ja tiheyttä, ehdotuksia hälytyksiksi ja liikenteenohjaustoimenpiteiksi sekä ruuhkan asteen. Säännöt (laatikko 6) ovat loogisia riippuvaisuuksia, jotka käsittelevät staattisia ja dynaamisia tietoja.

Tiedot tähtäävät tavoitteiden (laatikko 13) saavuttamiseen. Tavoitteet kuvaavat järjestelmän toimintaa ihanteellisissa olosuhteissa, joka on riippuvainen liikennevirran dynaamisista muutoksista ja liikenneturvallisuudesta. Tavoitteisiin pääseminen on kuitenkin aina tasapainottelua palvelutason ja turvallisuuden välillä. Kun ohjaustoimenpide on päätetty toteuttaa (laatikko 14), sitä voidaan pitää tason yksi toimenpiteenä, jos se ei vaadi operaattorin toimenpiteitä, ja tason kaksi toimenpiteenä, jos se taas vaatii. Päätösgeneraattori lähettää käskyt käskygeneraattorin välityksellä ohjaajille (laatikko 15), jotka ohjaavat jokaisen osajärjestelmän toimintaa tiellä (laatikko 12).

Jos tiellä sattuu yhtä aikaa useampia erillisiä onnettomuuksia tai muita hätätilanteita, asiantuntijajärjestelmän täytyy päättää tilanteiden arvojärjestys. Tällöin vuorovaikutteinen ohjelma kysyy operaattorilta käyttöliittymän välityksellä tämän

käsityksen tilanteesta. Tämä tieto syötetään (laatikko 3) päättelyjärjestelmään (laatikko 11). Toisessa vaiheessa ohjelma ehdottaa rajallista määrää ohjaustoimenpiteitä, jotka operaattori voi hylätä tai hyväksyä oman näkemyksensä perusteella, ja muutamaa strategiaa, joista yksi laitetaan käytäntöön, jos operaattori hyväksyy sen.

Järjestelmä toimii kahdella tasolla: toinen moottoritiellä ja toinen liikennekeskukseen asennetuilla laitteilla. Järjestelmässä on kolme erillistä osaa: automaattinen datan keräys- ja prosessointiosa, kameramonitorointi, ja hätäpuhelimet. Ensimmäinen osa pitää sisällään tielle asennetut laitteet kuten liikenteenilmaisimet, sääilmaisimet, ilman laadun mittarit, muuttuvat opasteet ja liikennevalot. Induktioilmaisimia on asennettu tielle 500 metrin ja tunneleihin 250 metrin välein. Ilmaisimet lähettävät liikennetiedot 15 sekunnin välein. Kameramonitorointi perustuu 36:een kiinteästi asennettuun TV-kameraan, joista 20 asennetaan tunneleihin ja loput tienvarteen. Tunneleissa kamerat ovat 300 metrin välein ja vapailla tieosuuksilla huomattavasti harvemmin.

5.6 Yhdysvallat

5.6.1 Washington

Washingtonin osavaltioon ollaan suunnittelemassa liikenneinformaatiojärjestelmää. Järjestelmän ongelmana se, että se saa tietoja useista eri lähteistä ja sen pitää tarjota informaatiota maantieteellisesti hajanaisella alueella. Osavaltion alueella on käynnissä useita erilaisia telematiikkahankkeita. Kukin näistä itsenäisistä järjestelmistä kerää tarvitsemansa liikennedatan omiin tarpeisiinsa, vaikka ne hyötyisivät siitä, jos pääsisivät käsiksi kaikkiin tietolähteisiin. (Luku 5.6.1 perustuu viitteeseen Dailey ym. (1993).)

Telematiikkasovellukset, jotka perustuvat ainoastaan yhden tyyppiseen dataan, ovat rajoitettuja. Yhden tyyppinen data, oli se sitten induktioilmaisimista saatuja liikennemäärä- ja varausastetietoja, satelliitteihin perustuvaa GPS-seurantaa, laseriin perustuvaa ajoneuvojen tunnistamista, radioon perustuvaa ajoneuvojen sijainnin tunnistamista tai mitä tahansa muuta reaaliaikaista dataa, esittää vain yhden puolen liikennetilanteesta. Näiden reaaliaikaisesti toimivien tietolähteiden lisäksi on olemassa staattisia ja dynaamisia tietoja, kuten karttatietokantoja, tietoja tietöistä sekä erityistapahtumien aikatauluja, jotka ovat myös olennaisia kokonaiskuvan hahmottamisessa. Ainoastaan erilaiset tietolähteet yhdistämällä saadaan luotettava ja tarkka kokonaiskuva liikenteestä.

Ensimmäinen ongelma yhteisen tietokannan rakentamisessa on saada kaikki data yhteen. Kun data on saatu koottua, seuraava ongelma on yhdistellä erilaiset datatyyppit luotettavaksi, tarkaksi ja dynaamiseksi liikennetietokannaksi. Washingtonissa on esitelty eräs ratkaisu ongelmaan. Ratkaisu tarjoaa mahdollisuudet (1) muuttaa alueen kokoa, (2) käyttää joustavasti useita eri käyttöliittymiä, (3) laajentaa järjestelmää uusiin asiakkaisiin ja uusiin tai paranneltuihin tietolähteisiin, (4) takuuseen, että eri tahot saavat käyttää itsenäisesti tällä hetkellä hallitsemiaan tietolähteitä, samalla kun pääsevät käsiksi uusiin tietokantoihin, ja (5) järjestelmään, joka toimii maantieteellisesti hajanaisella alueella.

Washingtonin liikenneinformaatiojärjestelmän suunnitelmassa telematiikka-arkkitehtuuri jakautuu kolmeen järjestelmään: tiedon kokoamiseen, yhdistelyyn ja jakamiseen. Kaikki nämä järjestelmät jakautuvat vielä osajärjestelmiin.

Kokoamisjärjestelmän täytyy tukea useita erilaisia tietolähteitä, jotka perustuvat erilaisiin tekniikoihin ja ovat sekä maantieteellisesti että juridisesti hajanaisia. Järjestelmän lähtökohtana täytyy myös olla se, että sekä tietolähteiden että tietolähdetyyppien määrä kasvavat tulevaisuudessa. Kokoamisjärjestelmä tarjoaa keräämänsä datan tiedonyhdistelyjärjestelmän käyttöön. Tiedonyhdistelyjärjestelmän tehtävänä on vastaanottaa ja yhdistellä useista eri järjestelmistä tullut data. Järjestelmän täytyy siis pärjätä hyvin erityyppisten datojen ja samasta asiasta kerotvien useiden eri parametrien (esim. ruuhka-aste ja nopeudet) kanssa. Tiedonyhdistelyjärjestelmä puolestaan tarjoaa muokkaamansa datan tiedonjakajajärjestelmälle, joka välittää sen eteenpäin eri sovelluksille.

Järjestelmän selkärankaa, joka takaa yhteydet kaikille järjestelmän osallisille fyysisestä sijainnista huolimatta, ehdotetaan sijoitettavaksi internetiin. Liittämällä järjestelmä internetiin välttytään käyttöliittymälaitteiden ja -ohjelmistojen suunnittelulta ja voidaan keskittyä suoraan itse järjestelmään ja sen ongelmiin.

Käyttäjien moninaisten tarpeiden takia, järjestelmän toimintaedellytyksenä on, että käyttäjät saavat datan käyttöönsä millä tahansa jalostusasteella, eli valinnan mukaan esimerkiksi joko muokattuina lukuina tai raakadatana. Lisäksi järjestelmän täytyy sallia pääsy kaikille niille tahoille, jotka haluavat antaa oman datansa joko kokonaan tai osittain muiden käyttöön. Koska se, että muutkin pääsevät dataan käsiksi, ei muuta sisäisesti käytettyä dataa tai sen rakennetta, järjestelmän pitäisi olla houkutteleva kaikille telematiikkasovelluksien käyttäjille.

5.6.2 Houston

Houstonissa, Yhdysvaltojen neljänneksi suurimmassa kaupungissa, on aloitettu uusi liikenteenhallintaohjelma, joka perustuu automaattiseen ajoneuvojen tunnistamiseen (AVI). Ajoneuvojen tunnistamisjärjestelmä on suunniteltu tarjoamaan liikennetietoja yli 380 maililla pääteitä ja yli 100 maililla HOV-kaistoja (HOV = monimatkusta-ajoneuvo). Liikennetietojärjestelmän avulla liikennekeskus arvioi viivytyksiä, määrittelee, johtuvatko viivytykset rikkoutuneesta ajoneuvosta, onnettomuudesta vai yksinkertaisesti ruuhkasta, sekä välittää tiedot tienkäyttäjille. Liikennetiedot välitetään muuttuvien opasteiden ja paikallisradion liikenne raporttien avulla. Järjestelmän ansiosta työmatka-ajat ovat lyhentyneet ja ruuhkat vähentyneet. (Luku 5.6.2 perustuu viitteeseen Larue 1995.)

Automaattista ajoneuvojen tunnistamisjärjestelmää kokeiltiin ensin pienemmällä koealueella. Kokeilussa vapaaehtoiset käyttivät matkapuhelimia sijaintinsa ja liikenneolosuhteiden raportoimiseen. Ruuhkan aikana tällaisia raporttipuheluja saattoi tulla 200 tunnissa. Puheluja tehtiin noin 3 - 4 mailin välein koko 20 mailin mittaisen koealueen matkalla, mikä tarkoitti sitä, että vapaaehtoiset ottivat noin 10 - 12 kontaktia päivässä. Tietokoneohjelma laski pisteiden välisiä matka-aikoja ja keskimääräisiä nopeuksia ajoneuvon tunnistamisen ja annetun liikenneinformaation perusteella. Järjestelmän heikkouksia olivat saadun informaation vaihtelevuus, sen saaminen viiveellä ja yhä vähenevässä määrin sekä menetelmän

vaatima valtava työmäärä. 75 prosentin osanotolla saatiin kuitenkin koottua niin paljon tietoa, että päästiin AVI-ohjelman ensimmäisen vaiheen käyttöön.

Tarkan AVI-järjestelmän kehittämiseksi käytettiin radiotaajuuden tunnistamistekniikkaa. Tunnistin, jota kutsutaan myös lähetin-vastaanottimeksi, toimii anonyyminä ajoneuvojen tunnistimena. Kun anturijoneuvo ohittaa ajoradan yläpuolelle asennetun antennin, tunnistimen tiedot välittyvät järjestelmään. AVI-järjestelmä lukee ja tulkitsee dataa. Anturijoneuvojen tunnistamisen lisäksi tiensivuun sijoitetut AVI-lukijat keräävät tietoa ajoneuvojen sijainneista ja ajankohdista sekä lähettävät tiedot modeemien välityksellä kokoamispaisteisiin, jotka koostuvat modeemeista ja puhelinlinjoista. Näistä pisteistä tiedot välitetään puhelinlinjoja pitkin liikennekeskukseen, jossa AVI-tietokone prosessoi ja työstää dataa. Datan avulla määritellään matka-aikoja, jotka välitetään tienkäyttäjille muuttuvien opasteiden ja paikallisradion avulla.

Ensimmäisessä vaiheessa järjestelmä koostuu tuhannesta ajoneuvotunnistimesta, 36 AVI-lukijasta ja 161 radioantennista, jotka on asennettu 3 - 4 mailin välein verkon uloimmille osille ja liikekeskustaan tiheimmillään mailin välein. Antennien keskimääräinen etäisyys on kaksi mailia.

AVI-järjestelmä lukee päivittäin useaan eri järjestelmään liittyviä tunnistimia. Ensimmäisen vaiheen tuhannen tunnistimen lisäksi alueella on 26 000 tietullin tunnistetta ja 500 000 muuta tunnistetta. Myös näitä muita tunnistimia, jotka käyttävät samaa radiotekniikkaa, käytetään hyödyksi liikennetietojärjestelmässä. Tämän tyyppisten järjestelmien kannalta onkin tärkeää, että tunnistinjärjestelmät ovat yhteensopivia.

Liikennetietojärjestelmien pääkohteena ovat vuorokauden kuusi pahinta ruuhkaintuntia. Järjestelmä yrittää tällöin parantaa liikenneolosuhteita ja lyhentää matka-aikoja. Ruuhkaisen päivän aikana järjestelmä havainnoi 3 000 - 4 000 tunnistinta. Ruuhkahuipun aikana järjestelmä pyrkii havainnoimaan vähintään yhden anturijoneuvon minuuttia kohti kustakin kohteesta. Tämä taajuus on riittävä luomaan tarvittavan määrän liikennedataa, jotta saadaan päivitettyä kuva liikennelanteesta ja voidaan antaa reaaliaikaista liikennetietoa.

Vaiheissa kaksi ja kolme AVI-järjestelmän peittoaluetta laajennetaan kattamaan paremmin koko kaupunkialue. Tunnistimia lisätään toisessa vaiheessa 3 200:lla, lukijoita 52:lla ja antennia 288:lla. Kolmannessa vaiheessa tunnistimia lisätään vielä 2 500 kpl. Tällöin lukijoita sijoitetaan HOV-kaistojen alku- ja loppupisteisiin, jolloin saadaan tietoa mm. linja-autojen aikataulutuksen ja reitityksen tarpeisiin.

5.7 Japani

5.7.1 Yleistä

Ensimmäinen alueellinen liikenteenohjausjärjestelmä asennettiin Tokioon vuonna 1970. Tämän jälkeen autojen määrä on kolminkertaistunut (Yumoto 1990). Vuonna 1991 Japanissa oli 4 869 km moottoriteitä, joita käytti päivittäin 2,75 miljoonaa ajoneuvoa. Kasvavat liikennemäärät ja rajallinen välityskyky ovat johta-

neet yhä kasvaviin ruuhkiin. Tilannetta hankaloittavat saarivaltakunnan geologiset ja meteorologiset olosuhteet (Maeda 1991).

Japanin tielaitos (Japan Highway Public Corporation, JHPC) ylläpitää Japanin pääteitä ja tarjoaa nykyään tienkäyttäjille tie- ja liikenneinformaatiota onnettomuuksista, tietöistä, ruuhkasta sekä huonoista ajo-olosuhteista, kuten sateesta, lumesta ja jäästä, sumusta, tuulesta sekä maanjäristyksistä. Liikennetiedon tarkoituksena on auttaa kuljettajia sekä kiinnittää heidän huomionsa liikenteenrajoituksiin. Tavoitteena on sujuva ja turvallinen liikenne. (Maeda 1991.)

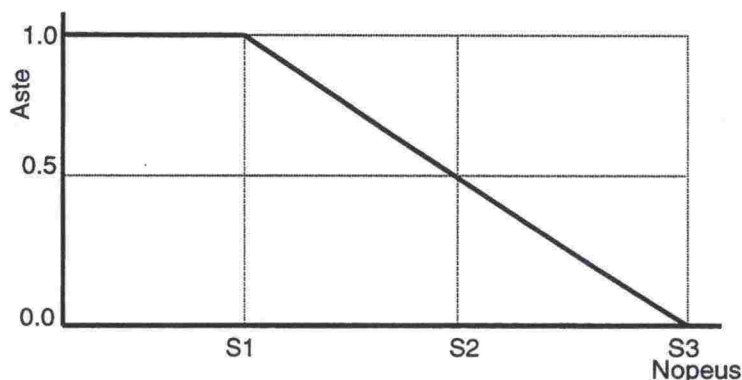
JHPC:llä on 14 liikennekeskusta ympäri maata ja näiden keskusten tehtävänä on tarjota liikenneinformaatiota. Keskukset keräävät tietoja teistä, liikenteestä, sääolosuhteista ja epätavallisista tilanteista. Tiedot kerätään partioautojen raporteista, tienkäyttäjille tarkoitettujen tienvarsipuhelimien, ilmaisimien, kameroiden ja säähavaintoja tekevien laitteiden välityksellä. Kerätyn datan pohjalta tienkäyttäjille annetaan reaaliaikaisia tietoja liikenneolosuhteista. Tiedot annetaan muutuvien opasteiden, radiolähetysten ja liikennetietotermiinaalien välityksellä. (Maeda 1991.)

5.7.2 Tokio

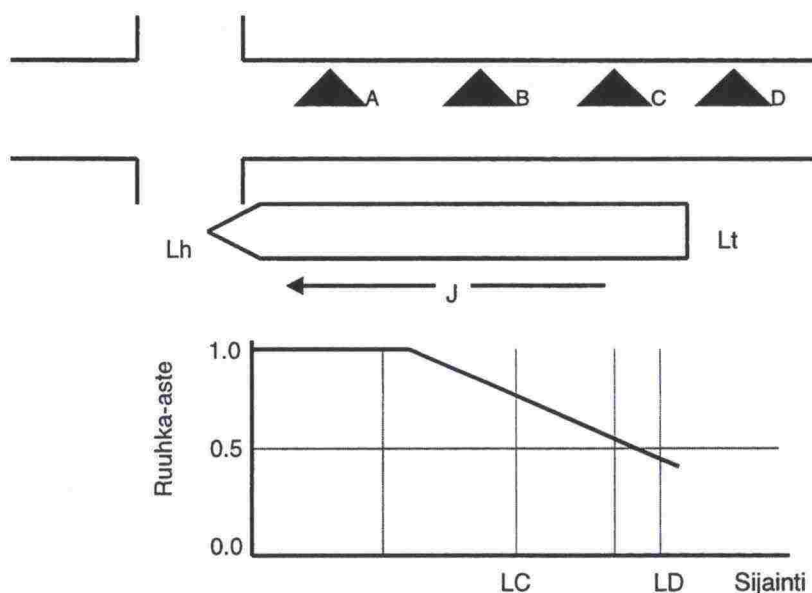
Tokion alueelle on asennettu liikenteenohjausjärjestelmän osaksi liikenneinformaatiota tarjoava järjestelmä. Järjestelmä koostuu liikennetietojen keräämisestä ja niiden välittämisestä tienkäyttäjille. Järjestelmä laskee ruuhkan pituuden ilmaisimista saadun informaation perusteella. Se käyttää ilmaisindataa myös ajoneuvojen tunnistusmenetelmän avulla määriteltujen matka-aikojen korjaamiseen sekä kokonaisten reittien matka-aikojen laskemiseen. Järjestelmä kerää matka-aikojen lisäksi muuta tietoa liikenteestä sekä tietoja pysäköintiolosuhteista. (Nakagawa ym. 1995.)

Järjestelmä valikoi ja muokkaa liikennetietoja sen median mukaan, jossa se aikoo informaation esittää. Liikenneinformaatiota annetaan tien yläpuolelle asennetuissa liikenneinformaatiotauluissa (muuttuvilla opasteilla, osittain muuttuvilla opasteilla, muuttuvilla graafisilla opasteilla ja monimuotoisilla graafisilla opasteilla), radion kautta, automaattisen puhelin- ja faksipalvelun välityksellä, liikenneinformaatiotermiinaaleissa ja tietoliikenteen (matkapuhelinten) välityksellä. (Nakagawa ym. 1995.)

Ruuhkan pituus lasketaan ajoneuvoilmaisindatasta seuraavalla tavalla. Määritellään ruuhka-aste, joka perustuu sumeasti kolmeen nopeuden raja-arvoon *kuvan 25* mukaisesti. Raja-arvot määritellään kunkin kohteen mukaisesti. Ilmaisimien järjestyksen ja niille laskettujen ruuhka-asteiden perusteella voidaan määritellä ruuhkan pituus ja jonon pään sijainti *kuvan 26* mukaisesti. Ne tiejaksot, joilla ruuhka-aste on jatkuvasti vähintään 0,5 tulkitaan ruuhkaisiksi. Jononpää on *kuvan 26* tapauksessa ilmaisimien C ja D välillä. Ruuhka-asteen oletetaan muuttuvan ilmaisimien välillä lineaarisesti, jolloin jonon pään sijainti saadaan laskettua. (Nakagawa ym. 1995, Takizawa ym. 1995.)



Kuva 25. Ruuhka-asteen määrittäminen nopeuden perusteella (Nakagawa ym. 1995, Takizawa ym. 1995).



Kuva 26. Ruuhkan pituuden määrittäminen ilmaisimien järjestyksen ja niiden ruuhka-asteiden perusteella (Takizawa ym. 1995, Nakagawa ym. 1995).

Ilmaisindatan ja ajoneuvojen tunnistamisen avulla lasketaan matka-aikoja. Ruuhkaisten tiejaksojen matka-ajan on havaittu olevan riippuvainen tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrästä (liikennetiheys) ja tiejakson liikennemäärästä. Matka-ajan yhtälö on siis seuraavanlainen.

$$T_j = \sum \frac{L_i \cdot K_i}{Q_i}$$

Yhtälössä T_j on ruuhkautuneen tiejakson matka-aika, L_i tiejakson pituus, K_i sen keskimääräinen liikennetiheys ja Q_i liikennemäärä. Koska ruuhkattomien tiejaksojen matka-ajat ovat lyhyitä, niillä ei ole suurta vaikutusta kokonaismatka-aikaan ja matka-aika lasketaan osajaksojen matka-aikojen summana. (Nakagawa ym. 1995.)

Toinen tapa laskea matka-aika on käyttää ajoneuvojen tunnistamista. Tämä on tehty rekisteritunnusmenetelmällä. Tällä tavalla mitattua ja estimoitua matka-ai-

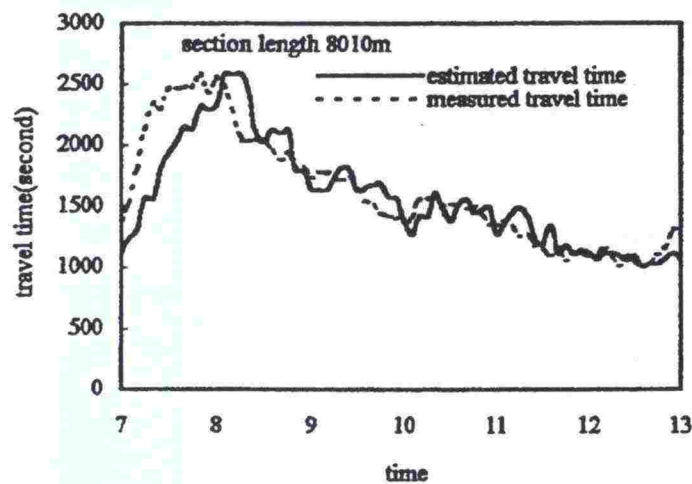
kaa pidetään tilastollisena datana ja ennustettu matka-aika lasketaan vertaamalla näitä arvoja kulloiseenkin ajoneuvoilmaisimien avulla estimoituun matka-aikaan ja korjaamalla arvoa. Matka-aikaennusteita tehdään teiden pääjaksoille aina seuraavalle 60 minuutille viiden minuutin välein. (Nakagawa ym. 1995, Takizawa ym. 1995.)

Järjestelmä kokoaa ruuhkainformaatiota seuraavan proseduurin mukaisesti:

- Määritetään ruuhkan pituus kullekin tiejaksolle tietyllä reitillä.
- Kun pahoin ruuhkautuneita tiejaksoja on useita peräkkäin eikä niiden välisten ruuhkattomien tiejaksojen pituus ylitä raja-arvoa, ruuhkat yhdistetään.
- Ruuhkan pituus määritellään 0,5 km tarkkuudella ja ruuhkan kesto 5 minuutin tarkkuudella.
- Määritellään ruuhkan vakavuus matka-aikana.

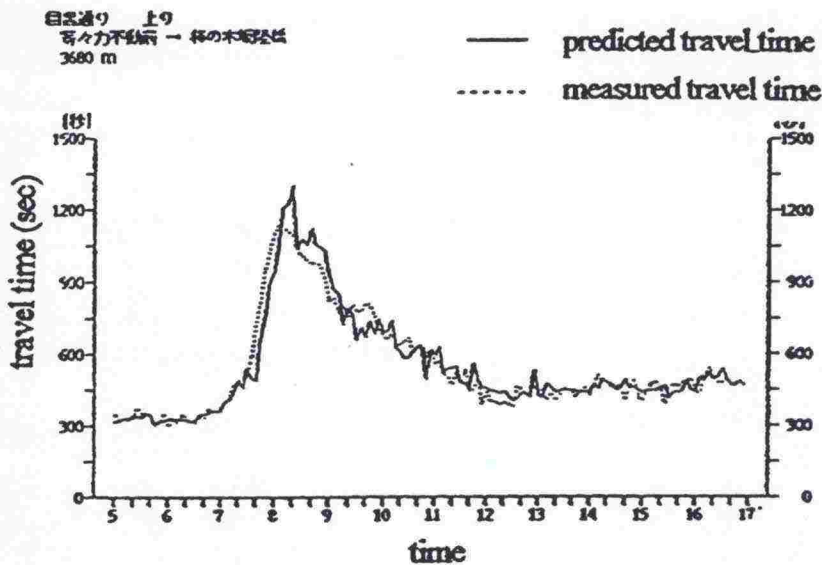
Jos ruuhkan alkupisteen lähellä on onnettomuus tai tietyö, tämä tulkitaan ruuhkan syyksi. (Nakagawa ym. 1995.)

Järjestelmä laskee matka-aikaennusteen niille tiejaksoille, joille matka-aika on estimoitu edellä esitellyn proseduurin mukaisesti. Tällä kertaa ennusteen tekemisessä otetaan huomioon aiemmin esitellyn mukaiset teiden pääjaksojen matka-aikaennusteet ja kumuloidaan matka-aika yli koko kiinnostuksen kohteena olevan reitin. Esimerkit erikseen lasketuista matka-aikaestimaateista ja -ennusteista on esitetty kuvassa 27 ja suorista ennusteista kuvassa 28. (Nakagawa ym. 1995, Takizawa ym. 1995.)



Kuva 27.

Mitatut (katkoviiva) ja estimoidut (yhtenäinen viiva) matka-ajat Ome-Kaido Avenuella. Estimaatit on tehty erikseen. (Takizawa ym. 1995.)



Kuva 28. Mitatut (katkoviiva) ja ennustetut (yhtenäinen viiva) matka-ajat Meguro-Dori Avenueella. Ennusteet on tehty suoraan. (Takizawa ym. 1995.)

Järjestelmä tuottaa tietoja ruuhkista, matka-ajoista kullakin tiejaksolla ja teiden pääjaksoilla, onnettomuuksista, tietöistä ja muista liikennettä rajoittavista häiriöistä sekä pysäköintialueinformaatiota. Järjestelmä tuottaa suuren määrän tietoa, josta teidenvarsi-informaationa tms. voidaan esittää vain pieni osa. Tästä syystä kussakin kohteessa olennainen informaatio täytyy erottaa vähemmän olennaisesta. Häiriöt laitetaan tärkeysjärjestykseen kussakin kohteessa määritettävän paikallisen vakavuutensa perusteella. Opasteissa annetaan matka-ajat ja ruuhkatiedot kahdelle tai kolmelle vaihtoehtoiselle reitille tiettyyn paikkaan opasteesta eteenpäin. (Nakagawa ym. 1995.)

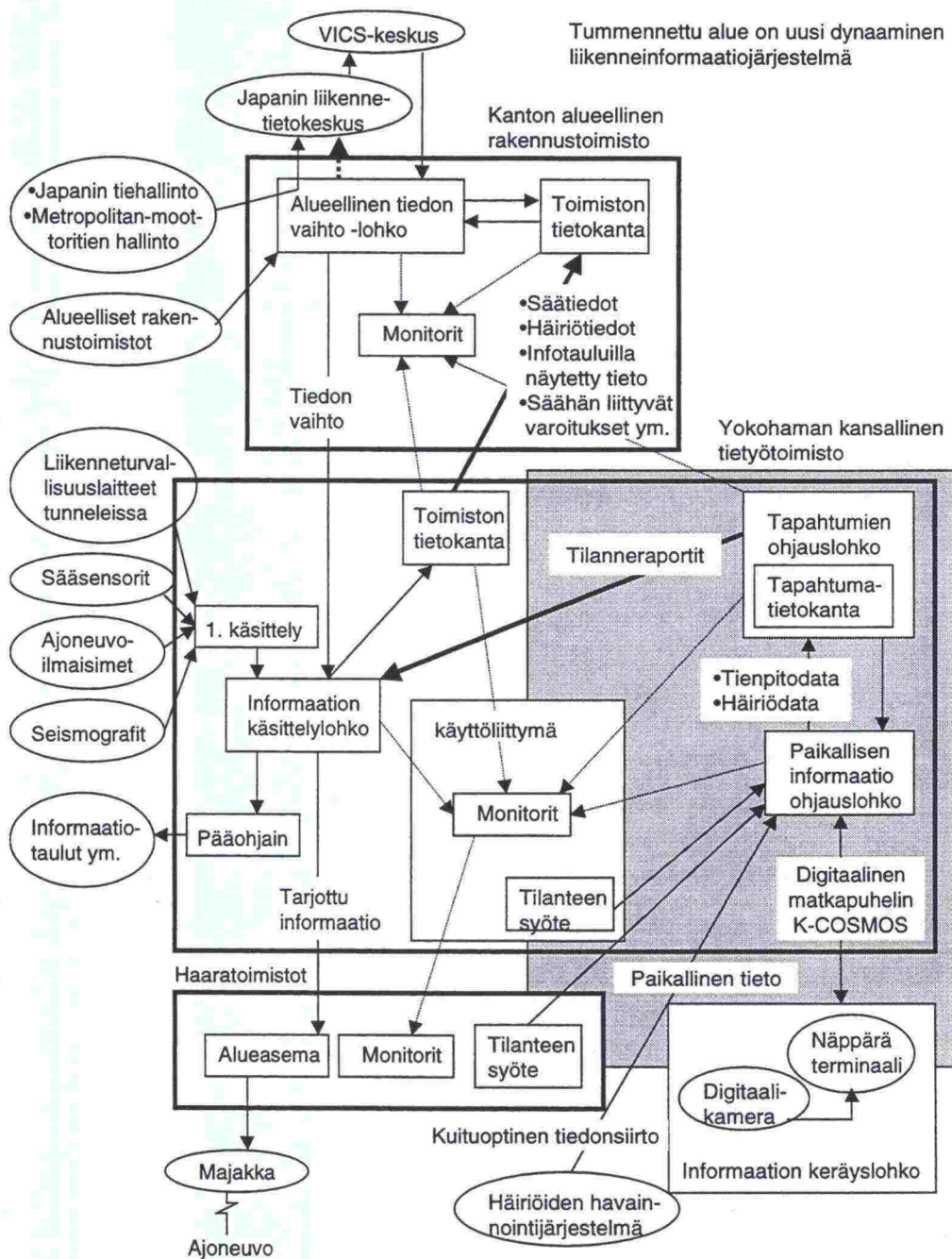
Järjestelmä säilöo viimeisimmän kuukauden liikennetiedot, kuuden päivän liikenteenohjauksen tulokset ja kahdeksan päivän aikana ajoneuvoille tarjotun liikenneinformaation tietokannassaan. Näiden tietojen lisäksi säilytetään viimeisimmän kuukauden päivittäiset liikennetilastot, vuoden kuukausittaiset liikennetilastot ja kymmenen vuoden vuosittaiset liikennetiedot. (Takizawa ym. 1995.)

5.7.3 Yokohama

Yokohaman alueella on liikennetietojärjestelmä, joka kattaa 240 km kansallisia pääteitä. Liikennetietojärjestelmä kerää ja analysoi dataa tie-, liikenne- ja sääolosuhteista voidakseen tarjota tienkäyttäjille tarvittavat liikennetiedot. Dynaaminen liikenneinformaatiojärjestelmä tarjoaa ajankohtaista tietoa tietöistä ja liikenteen häiriöistä. Järjestelmä tiivistää liikenneinformaation digitaaliselle kartalle. (Luku 5.7.3 perustuu viitteeseen Morimoto ym. (1995).)

Dynaaminen tietojärjestelmä muodostaa osan liikennetietojärjestelmää (kuva 29). Tieinformaatiojärjestelmä koostuu informaationkeräyslohkoista, eli "näppäristä" terminaleista, digitaalisista kameroista ja liikkuvasta kommunikaatiojärjestelmästä (kuten matkapuhelimista), paikallisen informaation ohjauslohkoista, ta-

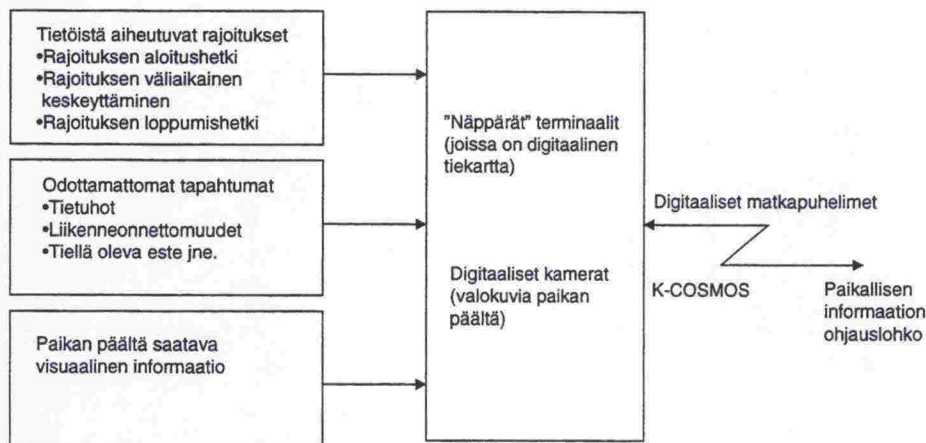
pahtumien ohjauslohkoista sekä käyttöliittymästä, joka on yhteinen liikenneinformaatiojärjestelmän kanssa.



Kuva 29. Yleiskuva dynaamisesta tietietojärjestelmästä (Morimoto ym. 1995).

Tieviranomaisten keräämiä liikennetietoja käytetään syötetietoina ”näppärissä” terminaaleissa. Liikennetiedot lähetetään liikennekeskukseen matkapuhelinverkon välityksellä yhdessä digitaalisten kameroiden ottamien valokuvien kanssa (kuva 30). Paikallisen informaation ohjauslohko ohjaa ”näppärien” terminaalien ja digitaalisten kameroiden välistä yhteydenpitoa ja vaihtaa tietoja näiden kanssa. Tapahtumien ohjauslohkon tehtävänä on hallita tietyt ja hetkelliset liikenne-

teenhäiriöt synnystä niiden selvittämiseen asti. Tieto liikenteenrajoituksista välitetään tiedonkäsittelylohkolle, joka on osa informaatiojärjestelmää, ja sitä kautta tienkäyttäjille muuttuvien opasteiden trms. välityksellä. Käyttöliittymän tehtävänä on mahdollistaa tietyöaikataulujen ja muun informaation syöttäminen järjestelmään sekä valvoa satunnaisia liikenteenhäiriöitä ja rajoitusolosuhteita tarkastellulla alueella. Käyttöliittymä on digitaalisen kartan muodossa.



Kuva 30. Liikennetietojen keräämislohko (Morimoto ym. 1995).

5.7.4 Tomein moottoritie

Tomein moottoritie on 252 km pitkä ja se kulkee Tokiosta Mikkabiin. Tälle tielle on asennettu nykyaikainen viimeisintä tietotekniikkaa ja kuituoptiikkaa hyväksikäyttävä liikennetietojärjestelmä. Järjestelmä koostuu useasta osajärjestelmästä: liikennemäärien monitoroinnista, kaukomonitoroinnista ja -ohjauksesta, muuttuvista opasteista, liikenne-radiojärjestelmästä, liikennetietotermiinaaleista sekä lepoalueiden ruuhkatietojärjestelmästä, joka kertoo lepoalueiden käyttöasteista. Liikennetietotermiinaaleja on asennettu tärkeimmille levähdysalueille ja niissä tarjotaan tienkäyttäjille tarkkoja tietoja liikennetilanteesta reaaliajassa informaatio-
taulujen, televisiomonitoien ja teletietopalvelun välityksellä. (Luku 5.7.4 perustuu viitteeseen Maeda (1991).)

Liikenneinformaatiojärjestelmä mittaa liikennemääriä ja ajoneuvojen nopeuksia kahden kilometrin välein asennetuilla ilmaisimilla. Viiden minuutin keskinopeuksia käytetään määrittämään ruuhkan pituus automaattisesti. Monitorointi- ja ohjausjärjestelmä koostuu laitteista, jotka lähettävät, kokoavat ja käsittelevät liikennetietoja. Kun tiellä tapahtuu jotain odottamatonta, liikennetiedot syötetään järjestelmään tapahtumien valvontajärjestelmän kautta: liikennekeskuksessa järjestelmään syötetään tietoja ajankohdasta, sijainnista, syystä sekä sen hetkisestä tilanteesta. Tietokoneohjelma käsittelee datan ja päättää, mihin muuttuviin ilmasimiin laitetaan viesti ja minkälainen viesti. Tulokseksi saadut viestit esitetään muuttuvissa opasteissa, jolloin tienkäyttäjät tietävät, mitä on tapahtunut ja missä. Tiedot välitetään myös liikenne-radioon ja muihin tiedonvälityskanaviin. Tämän jälkeen käsitellään automaattisesti liikennemäärädataa, jotta saadaan selville

ruuhkan aste. Muuttuvien opasteiden, liikenne-radion ja liikenneterminaalien viestejä päivitetään viiden minuutin välein.

5.7.5 Metropolitan-moottoritie

Myös Metropolitan-moottoritie sijaitsee Tokion alueella. Se on 250 km pitkä ja sitä pitkin kulkee yli 1,1 miljoonaa ajoneuvoa päivittäin. Tie palvelee kaupunkien välisenä moottoritienä, mutta se palvelee myös kehäteitä pitkin kaupunkiin meneviä ja sieltä poistuvia autoilijoita. (Luku 5.7.5 perustuu viitteeseen Honda & Yoneyama (1995).)

Metropolitan-moottoritieellä on tärkeytensä takia seuraavanlaisia ongelmia: kroonisesti lisääntyvä ruuhka, joka johtuu jatkuvasti kasvavasta liikennemäärästä, käyttäjien lisääntyvä tarve saada tarkempaa informaatiota ja lisääntyvät kriittiset liikenneonnettomuudet, jotka johtuvat monista kaarteista, mäistä ja liittymistä, jotka vaativat valppautta kaupunkialueella ajettaessa. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi alettiin vuonna 1989 tehdä kokeita siitä, kuinka radiomajakoita voitaisiin käyttää apuna. Vuonna 1993 kokeet laajennettiin myös kahteen muuhun mediaan: valomajakoihin ja monikaistaisiin FM-lähetyskeskisiin. Samalla esiteltiin ja laajennettiin liikenteenohjausjärjestelmää. Vakituksessa käytössä järjestelmä on ollut marraskuusta 1995 lähtien.

Radioaaltomajakajärjestelmä vastaanottaa liikenneinformaatio- ja kommunikointijärjestelmän (VICS) kookeskuksen lähettämää liikenneinformaatiota, tekee tarvittavat datamuunnokset, esittää tiedon graafisesti sekä lähettää tulokset majakoille ja majakoiden aluekeskuksiin. Kokeessa majakat välittivät liikennetiedot ajoneuvon sisäisiin laitteisiin, jotka esittivät datan yksinkertaisina graafisina kuvina. Järjestelmän on todistettu toimivan hyvin.

VICS on suunniteltu kokeellisten tulosten perusteella ja sillä on seuraavanlaisia ominaisuuksia.

- Se tarjoaa reaaliaikaisesti muuttuvaa liikenneinformaatiota.
- Liikenneinformaatio koostuu staattisista (pysyvää informaatiota: opasteiden sijainti jne.) ja dynaamisista tiedoista (päivitettävää informaatiota: liikenteenhäiriöt, rajoitukset, ruuhka, matka-aika jne.), joita päivitetään yhden tai viiden minuutin välein.
- VICS tarjoaa informaatiota useisiin eri käyttötarkoituksiin (parametrejä, yksinkertaisia kuvia ja kartoja).
- Informaatio perustuu yhdenmukaistettuun standardiin.
- Järjestelmä tarjoaa optimaalista reitti-informaatiota, joka perustuu liikenneolosuhteisiin kullakin reitillä.

VICS-järjestelmä tarjoaa tietoja muun muassa sen hetkisestä sijainnista ja tieprofiilista. Tavoitteena on helpottaa ruuhkaa ja parantaa liikenneturvallisuutta tehostamalla liikennettä.

Radioaaltomajakat voivat kukin lähettää erilaista informaatiota. Koska kunkin majakan peittoalue on rajoitettu pieneksi, jokainen majakka voi tarjota paikallista informaatiota. Majakoiden asennustiheys vaihtelee, koska jokainen majakka voidaan asentaa sinne, minne sitä tarvitaan. Majakat voivat hetkittäin tarjota use-

ammanlaista informaatiota yhtä aikaa tai antaa informaatiota yhtä aikaa useammassa paikassa. Majakat voivat käyttää samaa taajuutta koko maassa, koska niiden peittoalue on niin pieni, ettei päällekkäisyyksiä juuri satu. Majakan ja ajoneuvon sisäisen laitteen välinen yhteys mahdollistaa nopean digitaalisen kommunikation.

5.8 Taiwanin moottoritieverkko

Taiwanissa on lisääntyvän liikenteen ja pahenevien ruuhkien takia ryhdytty kehittämään uusia liikenteenhallintastrategioita. Moottoriteille ollaan suunnittelemassa kehittyneitä digitaaliseen kommunikaatioon perustuvaa seuranta- ja ohjausjärjestelmää. Alueellisten reaaliaikaisiin havaintoihin perustuvien liikenteenohjausstrategioiden ja -laitteiden käyttöönoton helpottamiseksi hankittiin yhdistetty moottoritieliikenteenhallinnan älyjärjestelmä. Se on suunniteltu parantamaan reaaliaikaisia liikenteenhallintaoperaatioita kriittisten liikenteenhäiriöiden, kuten satunnaisen ruuhkan, onnettomuuksien, huonon sään tai erityistapahtumien yhteydessä. Järjestelmä vähentää odottamattomien häiriöiden, ei-toivotun ruuhkan ja liikennevirran paikallisen pysähtymisen vaikutuksia. (Luku 5.8 perustuu viitteeseen Chang ym. (1995).)

Kehittynyt työasemalaskenta ja vuorovaikutteinen ohjelmointitekniikka voivat tehostaa liikenteenhallintastrategioiden käyttöönottoa. Tekoäly- ja asiantuntijajärjestelmät edustavat järjestelmällisiä suunnitteluproseduureja ja ohjelmointitekniikoita, jotka voivat tukea reaaliaikaista päätöksentekoa ja liikenteenohjausta sekä vähentää operaattorista aiheutuvia virheitä. Changin ym. (1995) tekemä tutkimus on selvittänyt sääntöjä olemassa olevista vastuusuunnitelmista ja kehittänyt asiantuntijajärjestelmän tukemaan reaaliaikaista valtakunnan laajuista moottoritieliikenteenohjausta ja liikenteenhallinnan käyttöönottoa.

Osana moottoriteiden rakentamisprojektia ollaan kehittämässä digitaaliseen kommunikaatioon perustuvaa tietokoneistettua liikenteenhallintajärjestelmää. Aikaisemmin liikenteenhallintakeskuksen piti seurata moottoriteiden liikennettä ja vastata häiriöraportteihin käsin lähettämällä viestejä muuttuviin opasteisiin ja pelastuspartiot häiriöpaikoille. Operaattoreiden piti toimia erilaisissa tilanteissa ennalta määrätyn suunnitelman ja paikkasidonnaisen ohjauksen mukaisesti. Kehitteillä oleva asiantuntijajärjestelmä tulee parantamaan ohjausstrategiaa automatisoimalla sen. Se tulee myös palvelemaan päätöksenteon tukena tietokoneistuksessa liikenteenhallintajärjestelmässä.

Taiwaniin rakennetaan ruuhkien helpottamiseksi uusia moottoriteiosuuksia. Infrastruktuuriin perustuva liikenneinformaatiojärjestelmä käyttää muuttuvia opasteita ohjatakseen tienkäyttäjät vaihtoehtoiselle reitille olemassa olevilla moottoriteillä. Teille on asennettu ilmaisimia 500 metrin välein havaitsemaan liikenteen häiriöt automaattisesti. Tiellä on myös hätäpuhelimia autoilijoiden avuksi. Vaka-
vien onnettomuuksien takia voidaan käyttää kaistaohjausta, liittymisramppien sulkuportteja ja ramppien sulkumerkkejä. Liikenteenjakaumamalli on suunniteltu tuottamaan viestejä muuttuville opasteille. Malli tekee liikenne-ennusteita, generoi lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit ja suorittaa dynaamisen liikenteensijoittelun.

Liikenteenhallinnan asiantuntijajärjestelmä on suunniteltu parantamaan liikenteenohjausta. Liikenteenhallintatoimenpiteitä ovat päätöksenteon avustaminen häiriöiden havaitsemisessa sekä vahvistamis-, arviointi-, hallinta- ja vastausprosessit.

Kun tiellä syntyy häiriö, liikenteen tila havaitaan ja raportoidaan. Operaattorin täytyy varmistaa häiriön olemassaolo. Kun häiriö on vahvistettu, häiriön tyyppi, sijainti ja vakavuus täytyy selvittää. Tämän jälkeen arvioidaan häiriön kesto, sen mahdolliset vaikutukset liikennevirtaan sekä liikennetilanne vaihtoehtoisilla reiteillä. On havaittu, että operaattorin täytyy reagoida häiriöön nopeasti ja oikealla tavalla, jos halutaan minimoida häiriön vaikutukset. Asiantuntijajärjestelmä on käyttökelpoinen työkalu, jos halutaan minimoida reaktioaika ja taata samanlainen ohjausstrategia koko järjestelmän toiminta-alueelle.

Edellä kuvattua järjestelmää käyttämällä olemassa oleva tiekapasiteetti saadaan paremmin käyttöön, kun vaihtoehtoisia reittejä ja teitä hyödynnetään. Aikaisemman kokemuksen ja liikenteen analysoinnin avulla asiantuntijajärjestelmä valitsee parhaan liikenteenohjausstrategian ja kerää samalla käytännön kokemusta, kun tieto tapahtuneesta lisätään tietokantaan.

Muuttuvien opasteiden viestit jaetaan kolmeen luokkaan: tason 1 viestit ovat varoituksia, tason 2 ohjaavia ja tason 3 pakottavia viestejä. Viestin valinnassa ylävirrann nopeus ja häiriön estimoitu kesto ovat kaksi päätekijää. Sekä asiantuntijajärjestelmä että liikenteenjakaumamalli on yhdistetty tarkasteltavalle reitille kääntyvien ajoneuvojen osuuteen, joka on eräs asiantuntijajärjestelmän antamista tuloksista. Jos osuus on esimerkiksi yli 20 prosenttia, muuttuvissa opasteissa esitetään pakottava viesti, jos se on alle 20 mutta yli 10 prosenttia, viesti on ohjaava, ja jos taas osuus on alle 10 prosenttia, viesti on vain varoittava. Muuttuvien viestien päivitystiheys on määritetty muiden maiden kokemusten perusteella, koska tästä ei ollut kokemuksia Taiwanissa.

Liikenteenohjausjärjestelmä tekee yhteenvetoa liikenteen toiminnan palautteesta, jotta järjestelmä saataisiin mukautettua reaaliaikaiseen liikenteen monitorointiin ja havaintoihin kuljettajien käyttäytymisestä. Jos kuljettajat kokevat olonsa mukavaksi, ohjauksen tavoitteet saavutetaan paljon nopeammin kuin, jos kuljettajat kokevat olonsa epämukavaksi.

6 Liikenteenohjauksen ja liikenneinformaation vaikutukset liikennevirtaan

6.1 Muuttuvat nopeusrajoitukset

6.1.1 Valtatie 1

Viatek (1997) selvitti nopeusrajoitusmuutosten vaikutuksia liikkuvan auton -menetelmällä valtatiellä 1, jossa Uudenmaan tiepiirillä on vaihtuvia nopeusrajoituksia. Mittauksia tehtiin neljällä eri koeautolla arkipäivinä touko-kesäkuun vaihteessa kahdella eri viikolla, joista toisella nopeusrajoitus oli säädetty arvoon 80 km/h ja toisella 100 km/h. Kokeet pyrittiin tekemään silloin, kun liikennemäärä oli suuri. (Luku 6.1.1 perustuu viitteeseen Viatek (1997).)

Kokeet tehtiin pian muuttuvien nopeusrajoitusmerkkien asentamisen jälkeen, minkä takia tuloksissa voi olla mukana niin kutsuttua uutuusvaikutusta. Kaikki kokeet tehtiin hyvissä olosuhteissa, joten olosuhteiden ei pitäisi vaikuttaa kokeiden tuloksiin. Nopeusrajoituksen muutoksen mahdollinen vaikutus liikennevirtaan riippuu tie- ja liikenneolojen lisäksi valvonnasta. Valvonnan voitiin kuitenkin olettaa olevan tutkimuksen aikana vakio.

Viatekin (1997) sai tutkimustulokseksi, että nopeusrajoituksella 80 km/h ajoneuvojen keskimääräinen matkanopeus oli 86 km/h ja nopeusrajoituksella 100 km/h 96 km/h. Nopeusrajoituksen vaihtaminen muutti siis liikennevirran keskimatkanopeutta 10 km/h. Vastaavat pistenopeudet muuttuivat 5 km/h. Pienellä otoskoolla ja lyhyellä mittausjaksolla on kuitenkin voinut olla vaikutusta saatuihin tuloksiin.

Keskinopeuksien lisäksi tutkittiin suuria nopeuden muutoksia. "Suuren nopeuden muutoksen" määritelmänä käytettiin yli 10 km/h nopeuden laskua tai nousua 2 sekunnin aikana. Suure kuvaa nopeuden muutosten äkkinäisyyttä. Tulokseksi saatiin, että suuria nopeuden muutoksia, sekä kiihdytyksiä että hidastuksia, oli merkitsevästi enemmän 100 km/h nopeusrajoituksella kuin 80 km/h rajoituksella. Suuria äkkinäisiä nopeuden muutoksia oli pienillä liikennemäärillä enemmän, koska vapaissa olosuhteissa äkkinäisen esteen ilmaantuminen tielle aiheuttaa voimakkaan hidastuksen ja vastaavasti esteen jäädessä taakse voimakkaan kiihdytyksen. Suurilla liikennemäärillä liikennevirta itsessään minimoi poikkeavat nopeuden muutokset.

Nopeuden muutoksia tarkasteltiin liikennemääräryhmittäin (alle 600, 600 - 800, 800 - 1 200 ja yli 1 200 ajon./h). Nopeuden muutosten itseisarvojen keskiarvojen tarkastelu osoitti, että liikennevirrassa oli 80 km/h nopeusrajoituksen alaisena kaikilla liikennemääräluokilla enemmän nopeuden muutoksia kuin 100 km/h nopeusrajoituksen alaisena. Ero oli kuitenkin kaikissa liikennemääräluokissa alle 10 prosenttia.

6.1.2 Valtatie 5

Valtatiellä 5 otettiin Kuopion pohjoispuolella sijaitsevilla Kallansilloilla keväällä 1995 käyttöön Suomen ensimmäinen vaihtuvasuuntainen kaistaohjausjärjestelmä, jonka avulla liikennettä ohjataan sillan avaus- ja huoltotöissä. Liikenteenohjausjärjestelmään kuuluu 70 muuttuvaa liikennemerkkiä sekä nostosiltojen yhteydessä olevat puomit ja liikennevalot. Muuttuvista liikennemerkeistä suuri osa on nopeusrajoitus- ja kaistaohjausmerkkejä. Järjestelmään kuuluvan tiejakson pituus on noin 7 km. (Luku 6.1.2 perustuu viitteeseen Savo-Karjalan tiepiiri (1995).)

Liikenteenohjaus tapahtuu siltojen käyttöjärjestelmään liitetyn keskustietokoneen avulla ennalta ohjelmoitujen toimintojen mukaisesti. Tienkäyttäjiä varoitetaan "avattava silta" -liikennemerkillä, nopeusrajoitus lasketaan portaittain muuttuvilla nopeusrajoitusmerkeillä ja liikenne pysäytetään puomien kohdalle. Siltoja huollettaessa liikenne ohjataan käytettävissä oleville kaistoille muuttuvilla kaistaopasteilla. Nopeusrajoitusta voidaan lisäksi muuttaa keliolosuhteiden ja liikennetilanteen mukaan.

Järjestelmän vaikutuksia selvitettiin ennen-jälkeen-tutkimuksen avulla. Kenttämittaukset tehtiin iltaruuhkan aikana, sillan huoltotilanteessa. Jälkeen-tilanne erosi ennen-tilanteesta siinä, että jälkeen-tilanteessa liikenne pysäytettiin turvalisussyistä miestyönä tehtävien ohjausjärjestelyjen ajaksi. Jälkeen-tilanteessa tarkasteltiin siis jonosta purkautuvaa liikennettä eikä vapaata liikennevirtaa.

Liikennemäärä oli ennen-tilanteessa 17 prosenttia suurempi kuin jälkeen-tilanteessa. Nopeudet ennen huoltotöiden edellyttämiä ohjaustoimenpiteitä olivat ennen- ja jälkeen-tilanteissa samaa suuruusluokkaa. Huoltotöiden aikana ajonopeudet olivat sulkukohdassa ennen-tilanteessa 30 - 50 km/h ja jälkeen-tilanteessa 15 - 25 km/h. Eroon vaikuttaa kuitenkin se, että sulkukohdan nopeusrajoitus oli ennen-tilanteessa 60 km/h, kun se oli jälkeen-tilanteessa 30 km/h. Keskinopeus oli liikenteen jonouduttua ennen-tilanteessa noin 30 km/h ja jälkeen-tilanteessa noin 20 km/h. Kun nopeusrajoitus alennettiin muuttuvalla merkillä 100 km/s:stä 80 km/h:iin ja näytettiin samalla "avattava silta" -merkkiä, nopeudet lasivat jälkeen-tilanteessa noin 9 - 11 km/h mittauspisteen 1 kohdalla, joka sijaitsi noin 2,5 km ennen siltoja.

6.1.3 Sääohjauksinen tie (vt 7)

Muuttuvien nopeusrajoitusten vaikutuksia on selvitetty myös Karhulan ja Haminan välillä olevalla sääohjauksisella tiellä. Sääohjauksinen tie on noin 14 km pitkä moottoritiejakso, jolla on vaihtuvat nopeusrajoitukset sekä viisi muuttuvaa opastetta. Nopeusrajoituksia ja opasteita ohjataan automaattisesti tieosalla olevien kahden tiesääaseman tietojen perusteella. (Luku 6.1.3 perustuu viitteeseen Rämä (1997).)

Talven nopeusrajoituksiin on aikaisemmin vaikuttettu lähinnä kiinteillä alennetuilla talvirajoituksilla, jotka ovat normaalisti olleet käytössä lokakuusta maaliskuuhun. Kiinteä talvirajoitus 80 km/h alensi kaksikaistaisilla teillä koko liikenteen keskinopeutta 3,8 km/h verrattuna nopeusrajoitukseen 100 km/h ja moottoriteillä rajoi-

tuksen alentaminen 120 km/h:stä 100 km/h:iin alensi keskinopeutta 3,9 km/h. Vaikutus oli henkilöautojen nopeuksiin noin 5 km/h.

Liikennettä koskevat tiedot saatiin tutkimusta varten automaattisista liikenteenmittausasemista (LAM-asemat) ja tiesäättiedot tallennettiin kuudelta tiesääasemalta siten, että jokaisen liikenteenmittauspisteen sää- ja kelitilanteesta saatiin tietoa. Keli-, sää- ja kitkatietoja kerättiin myös käsin mittaamalla. Nopeusprofiileja kerättiin instrumentoidulla autolla seuraamalla liikennevirrasta satunnaisesti valittuja autoja vakioetäisyydellä.

Vaihtuvien nopeusmerkkien ja opasteiden tila tallennettiin liikennemerkkilokiin. Merkkilokin perusteella poimittiin ajanjaksot, jolloin nopeusrajoituksia oli alennettu tai/ja muuttuvissa opasteissa oli jokin kelistä kertova viesti. Näille koejaksoille haettiin kyseistä viikonpäivää ja kellonaikaa vastaavat vertailujaksot koetien aineistosta, jolloin opasteissa ei ollut keliviestejä ja talviaikana nopeusrajoituksena oli ollut 100 km/h ja kesäaikana 120 km/h.

Varsinaisen sääohjauksisen tien lisäksi selvitettiin, miten sääohjauksiset nopeusrajoitukset ja kelimerkit vaikuttivat keskinopeuksiin sääohjauksisen osuuden jatkeella valtateillä 7 ja 15. Sääohjauksisen tien jatkeiden aineistojen valintaperusteena käytettiin jatkeen mittauspistettä lähimpänä olevien muuttuvien merkkien lokia. Jatkeen tutkimusjaksoja valittaessa otettiin huomioon arvioitu ajoaika muuttuvilta merkeiltä jatkeen mittauspisteeseen.

Nopeusprofiilit piirrettiin laskemalla yksittäisistä ajoista nopeuksien keskiarvot 100 metrin välein. Tietoja käsiteltäessä yksittäiset ajot ryhmiteltiin edelleen tutkimusasetelman mukaisten tilanteiden mukaisesti ryhmiin, joista tuotettiin keskiarvokäyrät. Näitä käyriä verrattiin toisiinsa. (Rämä 1997.)

Vaihtuvat nopeusrajoitukset alensivat talvikaudella jonojen ulkopuolella ajaneiden henkilöautojen keskinopeuksia kelin aiheuttaman aleneman lisäksi 3,4 km/h ja koko liikenteen keskinopeutta 2,5 km/h. Alenemat ovat jonkin verran pienempiä kuin aikaisemmin tehdyssä kiinteiden talvirajoitusten kokeilussa. Tällöin nopeuksia alennettiin 120 km/h:stä 100 km/h:iin. Nyt nopeusrajoituksia alennettiin lisää eli talvella moottoriteillä käytettävästä nopeusrajoituksesta 100 km/h 80 km/h:iin.

Kesäkaudella nopeusrajoituksen alentaminen 120 km/h:stä 100 km/h:iin pienensi keskinopeutta enemmän kuin muutos 100 km/h:stä 80 km/h:iin talvikaudella. Rajoituksen vaikutuksesta koko liikenteen keskinopeus aleni 5 - 6 km/h ja henkilöautojen 7 - 8 km/h. Vertailutiellä, jossa oli voimassa 120 km/h nopeusrajoitus, kelin vaikutus keskinopeuteen oli pienempi kesällä kuin talvella.

Sään ja kelin perusteella vaihtuvien nopeusrajoitusten hyödyn voidaan olettaa olevan suurempi keleillä, jotka on vaikeita havaita liukkaiksi. Kun talvikauden aineistosta rajattiin pois sateisimmat kelit, joiden hankaluuden kuljettajat havaitsivat helposti, nopeusrajoituksen muuttaminen 100 km/h:stä 80 km/h:iin alensi koko liikenteen nopeuksia 2 km/h enemmän kuin koko aineistossa eli 4,6 km/h.

Muuttuvat nopeusrajoitukset pienensivät nopeuksien hajontaa sääohjauksisella tiellä. Rajoitukset vaikuttivat eniten korkeimpiin nopeuksiin. Sääohjauksisen järjestelmän nopeuksien hajontaa pienentävä vaikutus oli erityisen selvä talvella, mutta hajonta pieneni myös kesällä.

Vertailutiellä kelin huonontuessa nopeuksien hajonta sen sijaan kasvoi, vaikka keskinopeus aleni. Erityisesti nopeus, jonka alittaa 15 prosenttia kuljettajista, pieneni huomattavasti, mikä kertonee siitä, että kaikkein varovaisimmat kuljettajat alensivat nopeuttaan eniten. Osa kuljettajista siis alensi nopeuttaan kelin huonontuessa, mutta osa ei. Tulosta voidaan tulkita siten, että osa kuljettajista kokee nopeusrajoituksen ohjenopeudeksi.

Sääohjauksisen tien tyyppisellä järjestelmällä näyttää siis olevan huonon sään ja kelin aikana nopeuskäyttäytymistä yhdenmukaistava vaikutus. Tämä on liikenneturvallisuuden kannalta edullista.

Talviajan nopeusrajoituksen alentaminen sääohjauksisella tiellä alensi myös sieltä lähtevien ajoneuvojen keskinopeutta noin 1 km/h. Kesäkaudella muuttuvien rajoitusten ja viestien käyttö näytti kasvattavan sääohjauksiselta tieltä lähtevien keskinopeutta etenkin, kun käytössä oli 120 km/h:stä 80 km/h:iin alennettu rajoitus. Sekä nopeusrajoituksen alentaminen että liukkaan ajoradan muuttuva merkki pienensivät talvella keskinopeutta sääohjauksisen tien jatkeella. Kesällä 80 km/h nopeusrajoitus kuitenkin suurensi tätä keskinopeutta.

6.1.4 Valtatie 9

Keski-Suomen tiepiiri (1995) on selvittänyt muuttuvien nopeusrajoitusten vaikutusta valtatiellä 9 välillä Vaajakoski - Lievestuore - Kuopion läänin raja. Tiellä on käytössä kauko-ohjattavia nopeusrajoitusmerkkejä. Rajoitus voidaan muuttaa arvoon 80 tai 100 km/h. Rajoitus saadaan vaihdettua kaukosäätimellä ohiajavasta autosta. (Luku 6.1.4 perustuu viitteeseen Keski-Suomen tiepiiri (1995).)

Talvirajoituskautena, jolloin tiellä on normaalisti 80 km/h nopeusrajoitus, rajoitus muutettiin ylöspäin arvoon 100 km/h, kun kelitilanne ja lähiajan keliennuste olivat hyviä. Lyhyeksi aikaa tehtäviä muutoksia pyrittiin välttämään. Lokakuun alun ja maaliskuun lopun välisenä aikana nopeusrajoitus 80 km/h oli voimassa noin 108 päivää ja nopeusrajoitus 100 km/h 73 päivää.

Nopeusmuutoksista saatiin tiedot Lievestuoreen LAM-asemalta. Kun nopeusrajoitus nostettiin 80 km/h:stä arvoon 100 km/h, liikenteen keskinopeus nousi valoisana aikana 5,1 km/h edellisen päivän nopeuksiin verrattuna.

6.1.5 Länsiväylä

Muuttuvien nopeusrajoitusten vaikutuksia liikennevirtaan on Länsiväylällä tutkittu järjestelmän tuottaman liikennedatan ja kahden kelluvan ajoneuvon avulla. Tutkimusalue ulottui Helsingin ja Espoon rajalta Porkkalankadun liittymään. *taulukossa 9 ja 10* on esitetty erilaisista nopeussuureista saatuja tuloksia kais-toittain ohjauksen ollessa päällä ja pois päältä aamunruuhkan aikana. (Luku 6.1.5 perustuu viitteeseen Uudenmaan tiepiiri (1999).)

Taulukko 9. *Keskinopeudet ja nopeuden keskihajonnat (km/h) Länsiväylällä vasemmalla ja oikealla kaistalla ruuhkaohjauksen ollessa päällä ja pois päältä (Uudenmaan tiepiiri 1999).*

Nopeus- rajoitus	Keskinopeus, ruuhkaohjaus		Keskinopeus, ei ohjausta		Nopeuden keskihajonta, r.o.		Nopeuden keskihajonta, ei r.o.	
	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea
80 km/h	71,5	74,1	64,9	65,2	5,0	5,2	3,6	4,0
60 km/h	56,3	56,8			6,9	7,4		

Taulukko 10. *V₅₀- ja V₈₅-nopeuksien keskiarvot (km/h) vasemmalla ja oikealla kaistalla Länsiväylällä ruuhkaohjauksen ollessa päällä ja pois päältä (Uudenmaan tiepiiri 1999).*

Nopeus- rajoitus	V ₅₀ , ruuhkaohjaus		V ₈₅ , ruuhkaohjaus		V ₈₅ - V ₅₀	
	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea
80 km/h	70,4	71,2	75,8	77,0	5,6	5,8
60 km/h	55,7	56,3	65,8	66,8	10,1	10,5

Kun yksittäinen ajoneuvo kohtasi nopeusrajoitusmuutoksen 80:sta 60 km/h:iin, sen nopeus laski Uudenmaan tiepiirin (1999) tutkimuksen mukaan oikealla kaistalla keskimäärin 5,7 km/h ja vasemmalla 7,1 km/h. Kun kyseisen paikan vaikutus vähennettiin nopeuden muutoksesta, ruuhkaohjauksen osuudeksi jäi oikealla kaistalla 3,9 km/h ja vasemmalla kaistalla 5,5 km/h.

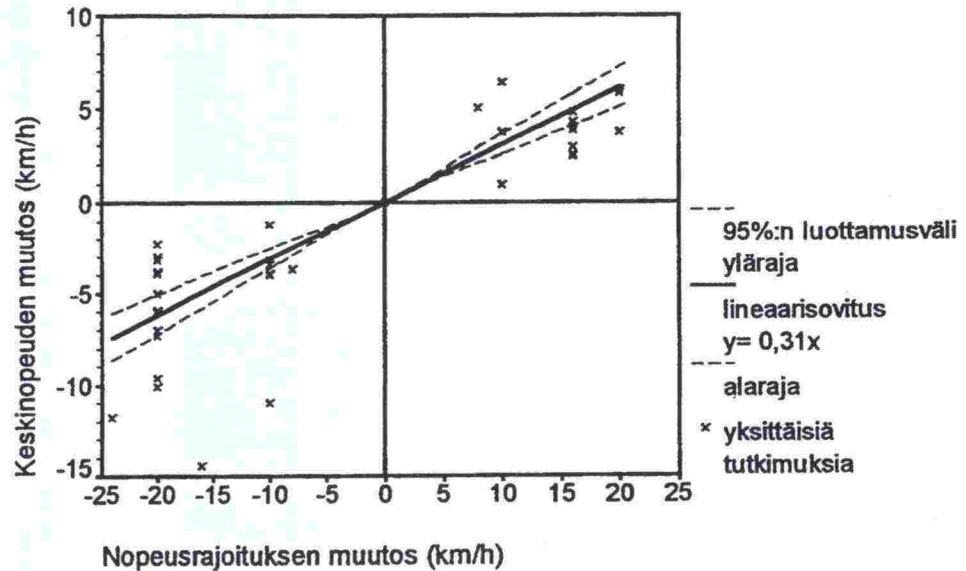
Tutkimuksessa havaittiin, että ruuhkan alussa ruuhkaohjaus alentaa nopeuksia ja pienentää niiden hajontaa, mutta ruuhkan jatkuessa nopeuksien hajonta kasvaa. Ruuhkan jatkuessa pitkään nopeusrajoituksen merkitys vähenee. Perusohjauksen (80 km/h) aikana nopeudet pysyvät kaiken aikaa yhtenäisempinä, koska liikennevirta on häiriöttömämpää.

6.1.6 Kansainvälisen kirjallisuusselvityksen tuloksia

Rannan & Kallbergin (1996) tekemässä kirjallisuusselvityksessä on selvitetty muun muassa kiinteiden nopeusrajoitusten muutosten vaikutuksia keskinopeuteen. Kirjallisuusselvityksen mukaan 80 km/h ja 100 km/h nopeusrajoitusalueilla keskinopeuksien ero on 10 km/h, mutta rajoitusmuutoksen 80 km/h:stä 100 km/h:iin (tai 100 km/h:stä 80 km/h:iin) on suomalaisissa tutkimuksissa todettu muuttavan keskinopeutta vain noin 4 km/h. (Luku 6.1.6 perustuu viitteeseen Ranta & Kallberg (1996).)

Kuvassa 31 on esitetty erisuuruisten nopeusrajoitusmuutosten vaikutus keskinopeuksiin. Graafisen esityksen yleiskuva on selkeä: nopeusrajoituksen korottaminen lisää aina keskinopeutta ja laskeminen pienentää sitä. Pistejoukkoon sovitetun origon kautta kulkevan suoran mukaan 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen keskimäärin 3,1 km/h (95 prosentin luottamusväli noin $\pm 0,6$ km/h) sekä rajoitusta korotettaessa että alennettaessa. Näin ollen nopeusrajoituksen muutos 20 km/h vaikuttaa keskinopeuteen 5,0 - 7,4 km/h. Nopeuden

muutoksissa oli kuitenkin paljon hajontaa. Pienimmillään nopeusrajoituksen korottaminen 10 km/h lisäsi keskinopeutta vain noin 1 km/h, suurimmillaan rajoituksen alentaminen 16 km/h (10 mph) alensi keskinopeutta noin 14 km/h.



Kuva 31. Erisuuruisten nopeusrajoitusmuutosten vaikutus keskinopeuteen. Rajoitusmuutoksesta 10 km/h seuraa $3,1 \pm 0,6$ km/h keskinopeuden muutos. (Ranta & Kallberg 1996.)

Suurin osa käsitellyistä nopeusrajoituksen alentamisista oli tehty Pohjoismaissa. Englannissa Finch ym. (1994) päätyi vastaavanlaisessa tarkastelussa esittämään, että 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen 2,4 km/h. Englantilainen tulos on hieman tässä tarkastelussa saatua tulosta pienempi. Osa tulosten erosta selittyy sillä, että vertailtavana olevassa englantilaisessa tutkimuksessa on mukana kaksi huomattavan suurta nopeusrajoitusmuutosta (+40 km/h ja -40 km/h), joiden vaikutus keskinopeuteen oli vain +3,2 km/h ja -3,2 km/h. Kyseisistä tutkimuksista ei ole saatu tarkempaa tietoa.

Nopeusrajoitusmuutoksia voidaan tarkastella myös sen mukaan, onko nopeusrajoitusmuutos tehty suurilla vai pienillä nopeuksilla. Pienillä nopeuksilla (< 60 km/h) tehtyjä mittauksia oli vain neljäsosa aineistosta ja nopeusrajoituksen korotuksia näistä ainoastaan yksi. Pääosa pienillä nopeusrajoituksilla saaduista tuloksista on yhdensuuntaisia muun aineiston kanssa. Viitteitä on kuitenkin siihen suuntaan, että keskinopeuden muutos saattaa pienillä nopeuksilla olla suurempi kuin suurilla nopeuksilla (kuvassa 31 +10 km/h ja -10 km/h rajoitusmuutoksen suurimmat absoluuttiset vaikutukset ovat nopeusrajoitusmuutoksilla 40 km/h:stä 50 km/h:iin ja 40 km/h:stä 30 km/h:iin).

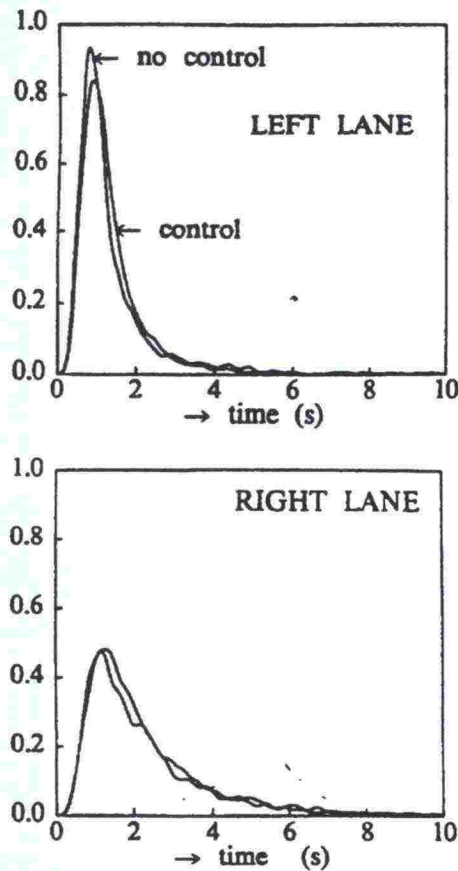
Tutkimustuloksia tarkasteltiin myös siltä kannalta, onko nopeusrajoituksen muuttamisella ollut erilainen vaikutus keskinopeuteen vanhimmissa (ennen 1980-lukua) ja uudemmissa tutkimuksissa. Tuloksissa ei havaittu merkitsevää eroa.

6.1.7 Hollantilaisia tuloksia

Muuttuviin nopeusrajoituksiin perustuvaa yhtenäistävää liikenteenohjausjärjestelmää kokeiltiin Hollannissa vuonna 1983. Koepaikkoina oli kaksikaistainen moottoritie lähellä Utrechtia ja kolmekaistainen moottoritie lähellä Rotterdamia, kumpikin pituudeltaan noin 6 km. (Smulders 1990.)

Yhtenäistävässä ohjauksessa kaikille kaistoille näytettiin samaa ohjenopeusrajoitusta yhtä aikaa. Nopeusrajoitusarvo valittiin ennalta määrätystä joukosta ja se vastasi liikennevirran todellista nopeutta. Tämä johti lähes aina nopeusrajoitusarvoon 90 km/h, joka on suunnilleen keskinopeus, kun liikennemäärä on lähellä tien välityskykyä. Joissain tapauksissa täytyi käyttää 80 tai 70 km/h nopeusrajoituksia. Ainoat optimoitavat parametrit tämän tyyppisessä ohjauksessa olivat nopeusrajoitusten päälle- ja poiskytkemisajat. (Smulders 1990.)

Tämäntyyppisen ohjauksen motiivina oli se, että ruuhka aiheuttaa liikennevirtaan huomattavaa epävakautta, kun liikennemäärä lähestyy välityskykyä. Suurella nopeudella lähekkäin ajavista ajoneuvoista aiheutuu liikennevirtaan shokkiaaltoja. Pienet häiriöt kasvavat ja voivat lopulta aiheuttaa liikenteen jumiutumisen ja ruuhkaa. On osoitettu, että jos jonossa ajavien ajoneuvojen väliset aikavälit alittavat tietyn raja-arvon, jonosta tulee epävakaata. Liikennevirran epävakaas aiheuttaa jo sellaisenaan pieniä häiriöitä, jotka puolestaan saavat ruuhkan aikaan. Esi-merkkeinä tällaisesta epävakaudesta on muun muassa peräkkäisten ajoneuvojen väliset nopeuserot samalla kaistalla sekä kaistojen väliset nopeus- ja liikennemääräerot. Kuvassa 32 on havainnollistettu suuria kaistojen välisiä eroja. Vasemman ja oikean kaistan erot aikavälien todennäköisyystiheyksissä ovat huomattavat. (Smulders 1990.)



Kuva 32. Aikaväleille estimoidut todennäköisyyden tiheysfunktiot vasemmalla ja oikealla kaistalla (Smulders1990).

Edellä käyty keskustelu viittaa kahteen tapaan välttää ruuhka: poistetaan häiriöiden aiheuttajat (kasvatetaan liikenteen homogeenisuutta) tai vähennetään pieniä aikavälejä (kasvatetaan liikennevirran vakautta). On myös selvää, että saavutettava vaikutus on rajallinen: kun liikennemäärä saavuttaa välityskyvyn, kuljettajien on "pakko" ajaa lähellä toisiaan, eli he kilpailevat olemassa olevasta tilasta ja syntyvät raot täyttyvät heti. Jokaista häiriötä ei myöskään voi välttää. Yhtenäistävän ohjauksen päätarkoitus on kasvattaa homogeenisuutta ja sitä kautta vähentää häiriöiden määrää. (Smulders 1990.)

Seuraavassa on esitelty Hollannissa tehdyn kokeilun päätuloksia.

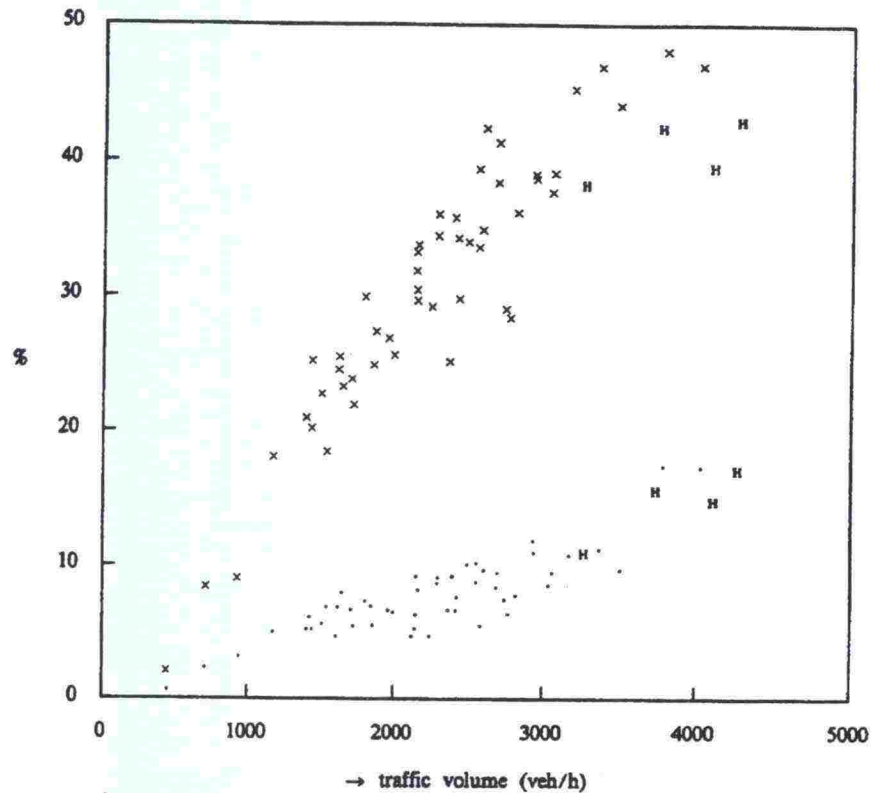
- Liikenteen epävakaas, mitattuna vakavien nopeuden laskujen määränä, laski yhtenäistävän ohjauksen seurauksena. Laskun määriteltiin olevan suuruusluokkaa 50 prosenttia.
- Ohjauksen aikana välityskyky ei laskenut. Pienestä kasvusta (1 - 2 %) oli joitain viitteitä.
- Muissa liikennettä kuvaavissa parametreissa, kuten keskinopeudessa, nopeuseroissa, kaistajakaumissa jne. ei havaittu merkitseviä muutoksia. (Smulders 1990.)

Tärkeimpänä johtopäätöksenä voidaan siis sanoa, että yhtenäistävä ohjaus on hyödyksi, koska se parantaa turvallisuutta ja pienentää ruuhkan todennäköisyyttä. Vaikutus ei johdu niinkään liikennevirran homogenisoitumisesta vaan sen va-

kauttamisessa. Järjestelmän käyttöönotossa ei raportoitu ongelmia, mikä kuvaa käytön helppoutta ja tämän tyyppisen ohjauksen selkeyttä. Suurimmaksi ongelmaksi jää selittää havaitut liikennevirtaa vakauttavat vaikutukset. Tästä syystä Utrechtin dataa käytettiin lisäselvitykseen. Tutkimukseen valittiin 8 tuntia dataa: 4 tuntia ilman ohjausta ja 4 tuntia ohjauksen kanssa. Data valittiin huolellisesti, jotta voitiin varmistua olosuhteiden samanlaisuudesta. Tutkimuksesta saatiin seuraavanlaisia tuloksia.

- Kun käytetään ohjausta, pienien aikavälien (≤ 1 s) osuudessa havaittiin vasemmalla kaistalla merkitsevä pieneneminen. Oikealla kaistalla ei havaittu vastaavaa vaikutusta.
- Myös aikavälien varianssi pieneni vasemmalla kaistalla.
- Keskinopeus laski hieman, mutta merkitsevästi molemmilla kaistoilla.
- Keskimääräinen välimatka ja aikaväli pienenivät merkitsevästi oikealla kaistalla.

Tärkein Smuldersin (1990) saama tulos oli pienien aikavälien osuuden pieneneminen vasemmalla kaistalla. Kuten aikaisemmin kerrottiin, nämä aikavälit, jotka vastaavat ajoneuvoja, jotka ajavat suurilla nopeuksilla lähellä toisiaan, ovat pääsyy liikennevirran epävakauteen. On myös tunnettua, että ruuhka alkaa yleensä vasemmalta kaistalta. Laskun merkitsevyyttä on esitetty *kuvassa 33*, jossa on esitetty pienien aikavälien osuus liikennemäärän funktiona. Data on eritelty kaistoittain. Havaintopisteet, jotka on merkitty H-kirjaimella, esittävät tilannetta, jossa liikenteenohjaus oli päällä. Vaikutus vasemmalla kaistalla on selvä, ja se on suuruusluokkaa 10 prosenttia, kun liikennemäärä on lähellä välityskykyä. Kuvasta nähdään myös se, että ohjausta on turha käyttää, kun liikennemäärä on alle 3 000 ajon./h. Pursulan ym. (1988) Länsiväylällä tekemän tutkimuksen tulokset alle sekunnin aikavälien osuuksista osoittavat, että Länsiväylällä pienien aikavälien osuudet olivat suurempia kuin *kuvassa 33* esitetyt Smuldersin saamat tulokset. Poikkeuksen muodostaa vasen kaista suurilla liikennemäärillä, jolloin tulokset ovat samaa suuruusluokkaa.



Kuva 33. Mitattujen alle yhden sekunnin aikavälien osuus liikennemäärän funktiona kaistoittain (x = vasen kaista, • = oikea kaista, H = ohjaus päällä) (Smulders 1990).

Kuvasta 33 voidaan jälleen kerran havaita kaistojen erilainen luonne. Kuvan perusteella vaikuttaa siltä, että epävakaas vähenee, kun liikennemäärä kasvaa. Tällöin vasen kaista alkaa olla kuormitettu ja oikealla kaistalla oleva tyhjä tila käytetään hyödyksi. Käytännössä ihanteellinen, täysin homogeeninen liikennevirta saavutetaan ainoastaan silloin, kun on muodostunut ruuhkaa, mutta tällöin liikennemäärä on huomattavasti välityskyvyn alapuolella. Lisävalaistusta asiaan antaa myös kuva 32, jossa on esitetty aikavälien estimoidut todennäköisyystiheydet ohjauksen aikana ja ilman ohjausta. (Smulders 1990.)

Pienien aikavälien osuuden vähentymisen seurauksena aikavälien varianssi pienenee. Esitetyille todennäköisyystiheyksille varianssi pieneni 16 prosenttia. Tätä selitetään sillä, että liikenteenohjauksen aikana ajoneuvot ajavat kauempana toisistaan (turvallisemmin) ja saavat tarvitsemansa lisätilan suurista väleistä, joita yhä esiintyy jopa suurilla liikennemäärillä. 100 metrin välit eivät ole harvinaisia silloinkaan, kun liikennemäärä on lähellä välityskykyä. Näin sekä suurien että pienien aikavälien osuus pienenee, mikä näkyy pienempänä varianssina. (Smulders 1990.)

Keskinopeuden lasku ohjauksen vaikutuksesta havaittiin kaikissa paitsi yhdessä datajoukossa. Laskun suuruus oli nolasta 5 prosenttiin molemmilla kaistoilla. (Smulders 1990.)

Keskimääräinen aikaväli pieneni oikealla kaistalla ohjauksen vaikutuksesta keskimäärin 3 prosenttia. Tämä viittaa liikennemäärän 3 prosentin kasvuun oikealla

kaistalla. Lähellä välityskykyä liikenne jakautui vasemmalle ja oikealle kaistalle suunnilleen suhteessa 3 : 2. Tästä syystä voidaan odottaa noin 1 prosentin kasvua kokonaisliikennemäärään. (Smulders 1990.)

Yhteenvedona voidaan todeta, että yhtenäistävän ohjauksen vaikutus ilmenee pääasiassa vasemmalla kaistalla olemassa olevan tilan uudelleen jakamisen muodossa ja että vaikutus on paikallista, koska ainoastaan osa autoilijoista tavoitetaan. Oikealla kaistalla vaikutus on globaali ja johtaa liikennemäärän kasvuun. (Smulders 1990.)

Amsterdamin ja Utrechtin välisellä moottoritillä tehtiin vuonna 1992 lisätutkimuksia muuttuvien nopeusrajoitusten vaikutuksista moottoritien liikennevirtaan. Uudemmissa kokeissa koejakson pituus oli 20 km. Kokeessa käytettiin ainoastaan nopeusrajoituksia 90 ja 70 km/h (nopeusrajoitus oli koealueella 120 km/h). Ajoina oli asennettu ilmaisimia vähintään kilometrin välein. Data kerättiin aamu- ja iltaruuhkan aikana normaaleissa keli- ja sääolosuhteissa (kuiva tie, hyvä näkyvyys). Vastaavalta jaksolta vuodelta 1991 saatiin vertailuaineisto ennen-jälkeen-tutkimukseen. (van den Hoogen & Smulders 1994.)

Nopeusrajoituksen muuttamista harkittiin kerran minuutissa tiejaksolla ajavien ajoneuvojen keskinopeuden perusteella siten, että virran keskinopeuden ja nopeusrajoituksen ero on pyritty pitämään pienenä. Nopeusrajoituksien tarkoituksena ei olekaan vähentää nopeuksia, vaan pienentää nopeuseroja sekä yksittäisillä kaistoilla että kaistojen välillä. Pienemmät nopeuserot jakavat liikenteen tasaisemmin kaistoille ja näin tien välityskyky saadaan paremmin käyttöön. Pienemmät nopeuserot myös vähentävät lyhyiden aikavälien osuutta ja näin vähentävät ja lieventävät shokkiaaltoja. (van den Hoogen & Smulders 1994.)

Kuljettajien suhtautumista muuttuviin nopeusrajoituksiin selvitettiin haastattelututkimuksen avulla. Tulokseksi saatiin, että suuri osa kuljettajista kertoi sopeuttavansa nopeutensa nopeusrajoituksen perusteella, jolloin he joko muuttivat nopeuttaan tai ajoivat virran mukana. Suuri osa kuljettajista kertoi hyötynensä järjestelmästä. Järjestelmä koettiin positiivisimmaksi kaikkein ruuhkaisimmilla tieosilla. Kuljettajien tietoisuuden järjestelmän tavoitteista on havaittu vaikuttavan positiivisesti kuljettajien käyttäytymiseen ja heidän suhtautumiseensa järjestelmään. (van den Hoogen & Smulders 1994.)

Nopeusrajoitusten vaikutuksia kuljettajien käyttäytymiseen selvitettiin mittaamalla nopeuksia, shokkiaaltoja ja aikavälejä. Tulokset on esitetty taulukossa 11. Analyysi osoittaa, että nopeudet alenivat ohjauksen johdosta kaikilla kaistoilla. Myös nopeuden vaihtelut pienenevät, mikä johti pienempiin nopeuseroihin kaistojen välillä. Shokkiaaltojen määrä ja vakavuus (määriteltynä nopeuden kokonaislaskuna kerrottuna nopeuden laskun ja sen keston osamäärällä) laskivat. Erityisesti sisäkaistalla alle sekunnin aikavälien osuus laski ja keskimääräinen aikaväli kasvoi ohjauksen aikana. Myös aikavälien varianssi ja kaistojen väliset erot pienenevät. Analyysin tuloksista voi siis vetää sen johtopäätöksen, että muuttuvat nopeusrajoitukset homogenisoivat liikennettä. (van den Hoogen & Smulders 1994.)

Taulukko 11. Kuljettajien käyttäytymiseen liittyviä parametrejä sisäkaistalla, kun liikennemäärä oli 6 400 - 6 800 ajon./h (van den Hoogen & Smulders 1994).

	Tiejakso 3		Tiejakso 4	
	Ei ohjausta	Ohjaus	Ei ohjausta	Ohjaus
Nopeus (m/s)	26,2	25,4	27,0	25,6
Alle 1 s aikavälejä (%)	41	40	44	36
Shokkiaaltojen vakavuus (m^2/s^3)	4,15	2,98	3,92	3,59

Muuttuvien nopeusrajoitusten vaikutusta moottoritien toimintaan selvitettiin tutkimalla liikennemääriä, nopeuksia, varausasteita ja välityskykyä poikkileikkaus- ja kaistatasolla. Tuloksista on esitetty yhteenveto taulukoissa 12 ja 13. Analyysi osoittaa, että keskinopeus laski ja että keskimääräinen varausaste kasvoi ohjauksen aikana. Nopeuden lasku havaittiin selvimmin ulkokaistalla. Kaistojen väliset erot parametreissä olivat pienempiä. Kaikki tämä viittaa homogeenisempaan liikennevirtaan. Ohjauksen positiivista vaikutusta välityskykyyn ja liikennemäärään ei voitu todistaa. (van den Hoogen & Smulders 1994.)

Taulukko 12. Nopeus ja varausaste (sekä hajonta) kaistoittain tiejaksoilla 3 ja 4, kun liikennemäärä oli 6 400 - 6 800 ajon./h (van den Hoogen & Smulders 1994).

		Ei ohjausta			Ohjaus		
		Ulko	Keski	Sisä	Ulko	Keski	Sisä
Tiejakso 3	Nopeus (km/h)	87 (5)	93 (7)	98 (8)	81 (6)	86 (7)	90 (8)
	Varausaste (%)	10,2 (1,4)	13,2 (1,4)	14,0 (1,5)	11,8 (1,3)	14,2 (1,1)	14,5 (1,0)
Tiejakso 4	Nopeus (km/h)	88 (5)	96 (7)	99 (9)	82 (4)	89 (4)	91 (5)
	Varausaste (%)	9,8 (1,3)	12,3 (1,3)	14,3 (1,5)	11,3 (1,5)	13,3 (1,1)	14,3 (0,7)

Taulukko 13. Liikennemäärät moottoritiellä erään liittymisrampin lähellä tiejaksoilla 3 hieman ennen ruuhkan alkua (van den Hoogen & Smulders 1994).

Sijainti	Ei ohjausta	Ohjaus
Ennen ramppia	5 236 ajon./h	5 252 ajon./h
Rampin jälkeen	6 440 ajon./h	6 404 ajon./h
Rampilla	1 204 ajon./h	1 152 ajon./h

6.2 Muuttuvat kelivaroitusmerkit

Tielaitos toteutti muuttuvien kelimerkkien kokeilun ensimmäisen vaiheen Turun tiepiirissä talvena 1993 - 1994. Tällöin todettiin liukkaasta kelistä varoittavan muuttuvan liikennemerkkin alentavan ajonopeutta noin 2 - 4 km/h. Vaikutukset hävisivät 440 - 1 100 metrin päässä merkistä. (Rämä ym. 1995.)

Koetta jatkettiin talvikaudella 1994 - 1995. Tavoitteena oli tutkia merkkien vaikutusta ajonopeuksiin ja aikaväleihin, vaikutuksen pysyvyyttä ja kestoja. Nopeus- ja aikaväliaineistot kerättiin induktioilmaisimilla ja instrumentoidulla mittausautolla. Kaikissa tutkimuskohteissa oli 80 km/h nopeusrajoitus. (Rämä ym. 1996.)

Nopeustietoja analysoitaessa tarkasteltiin keskinopeuksia (pistenopeuksien aritmeettista keskiarvoa) sekä nopeuseroa kelivaroitusmerkin jälkeen olevan mittauspisteen ja ennen merkkiä olevan mittauspisteen välillä. Keskiarvot laskettiin painotettuina tuntikeskiarvoaineistosta, jossa oli havaintoja sekä ennen merkkiä että merkin jälkeen olevista mittauspisteistä. Myös nopeuserojen tilastollinen merkitsevyys testattiin ja merkkien vaikutuksen suuruus arvioitiin. (Rämä ym. 1996.)

Nopeusprofileja kerättiin instrumentoidulla autolla seuraamalla liikennevirrasta satunnaisesti valittuja henkilöautoja 50 metrin vakioetäisyydellä. Instrumentoitu auto tallensi muun muassa ajomatka- ja nopeustiedot sekunnin välein. Analyysissä verrattiin keskenään eri koetilanteissa 100 metrin jaksoilta laskettuja keskiarvonopeuksia. Erojen merkitsevyys testattiin. (Rämä ym. 1996.)

Voidaan olettaa, että merkillä mahdollisesti aikaan saatavan nopeusvaikutuksen suuruus on riippuvainen siitä lähtönopeudesta, jota kuljettaja käyttää lähestyessään liukkaudesta varoittavaa merkkiä. Nopeustaso ennen merkkiä heijastaa mahdollisesti kuljettajien käsitystä vallitsevasta kelistä. Jos keli on jo ennen merkkiä havaittu liukkaaksi, nopeudet ovat todennäköisesti alhaisemmat kuin pillevän liukkauden aikana. (Rämä ym. 1996.)

Muuttuvan "liukas ajorata" -liikennemerkkin vaikutus ajonopeuksiin vaihteli koe-paikoittain. Merkki vähensi kiinteästi valaistuna liikenteen keskinopeutta merkin jälkeen noin 1 km/h ja vilkkuva viesti noin 2 km/h. Eräissä kohteissa nopeudet tosin hieman nousivat merkin asettamisen jälkeen. Vaikutukset olivat yleensä hieman suurempia vapaiden (jonojen ulkopuolella ajavien) ajoneuvojen osalta sekä pimeällä. "Liukas ajorata" -merkki ei yleensä vaikuttanut aikaväleihin. Merkin vaikutuksen nopeuksiin arvioitiin kestävän noin 3 kilometrin päähän. Vilkkuvana viesti näytti vaikuttavan kuljettajien käyttäytymiseen pidempään. Vaikutus todettiin jopa 14 km päässä. (Rämä ym. 1996.)

Merkin vaikutus väheni ensimmäisestä talvesta nopeuksien osalta noin 0,4 km/h. Tämä voi olla uutuusvaikutuksen seurausta, mutta myös seurausta koetalvien välisistä eroista. (Rämä ym. 1996.)

Kun säätien muuttuvien nopeusrajoitusten ja opasteiden vaikutusten tutkimuksessa tarkasteltiin tilannetta, jossa talvella nopeusrajoituksen lisäksi käytettiin liukkaasta varoittavaa merkkiä, keskinopeudet alenivat merkkiyhdistelmän vaikutuksesta vähemmän kuin pelkän alennetun rajoituksen vaikutuksesta. Syynä tähän oli todennäköisesti huonon kelin tunnistettavuus, mikä näkyy myös vertailu-

tiellä ajonopeuksien huomattavana laskuna pelkän kelin vaikutuksesta. Nopeusprofiileista nähdään, että "liukas ajorata" -merkkiä käytettäessä kelin ja merkkien yhteisvaikutus nopeuteen oli 15 km/h luokkaa. (Rämä 1997.)

Keskinopeuden muutosta tarkasteltaessa summataan erilaisia tilanteita yhteen. Tutkimusaineistossa oli ajanjaksoja, joissa merkin vaikutus oli selvästi keskinopeuden alenemaa suurempi. Keliviestin merkitys kuljettajalle ja kelimerkin vaikutuksen suuruus riippuvat tilanteesta, jossa merkki on käytössä. Kun liukkaus on helposti havaittavaa esimerkiksi lumipyryssä, on oletettavaa, että merkki ei vaikuta paljoakaan käyttäytymiseen. Sen sijaan piilevän liukkauden aikana merkki kertoo kuljettajalle tärkeää tietoa. (Rämä ym. 1996.)

6.3 Muuttuvat turvaväliopasteet

Muuttuvien kelivaroituserkkien tutkimisen yhteydessä selvitettiin muuttuvien turvaväliopasteiden vaikutuksia liikennevirtaan. Ensimmäisen talven tutkimuksissa saatiin tulokseksi, että turvaväliopaste vähensi tilastollisesti merkitsevästi alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonoissa. Pitävällä kelillä vähenemä arvioitiin 28 - 48 prosentiksi ja liukkaalla kelillä 37 - 47 prosentiksi. (Rämä ym. 1995.)

Toisen talven tutkimuksissa turvaväliopaste vähensi keskinopeuksia merkin jälkeen noin 1 km/h pitävällä kelillä. Liukkaalla kelillä, jolloin myös liukkaudesta varoitettava merkki oli näkyvissä, nopeusvaikutus oli samaa luokkaa. Turvaväliopaste vähensi alle 1,5 sekunnin aikavälien osuutta jonoissa noin 40 prosenttia sekä pitävällä että liukkaalla kelillä. Turvaväliopaste vaikutti noin 8 km matkan ajan. (Rämä ym. 1996.)

Merkin vaikutus väheni toisena koetalvena nopeuksien osalta noin 0,4 km/h ja alle 1,5 sekunnin aikavälien osuuden osalta runsaalla 5 prosenttiyksiköllä sekä pitävällä että liukkaalla kelillä. Kun merkkiin liitettiin lisäkilpi "suositus", sen vaikutus aikaväleihin väheni edelleen lähes 10 prosenttiyksikköä. (Rämä ym. 1996.)

Sääohjauksisella tiellä tehdyn tutkimuksen mukaan kehoitus "muista turvaväli" ei vähentänyt alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonossa. (Rämä 1997.)

6.4 Ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet

6.4.1 Valtatie 4

Ennen moottoritien rakentamista valtatie 4 ruuhkautui pahasti viikonloppujen ja juhlapyhien menoliikenteen takia välillä Järvenpää-Mäntsälä. Alueelle asennettiin muuttuva reittiopastusjärjestelmä kohtaan, jossa moottoritie muuttui yksiajorataiseksi valtatieksi, jolla oli määrävälein ohituskaistoja, ja jossa oli liittymä vanhalle tielle (maantie 140). Järjestelmä perustui ajoradan yli asennettuun porttaliiniin, jossa oli reittiopastustaulu. Taulussa voitiin näyttää tienkäyttäjille ennalta ohjelmoituja kiinteitä viestejä tai taululle lähetettyjä muuttuvia viestejä. Muuttuva reittiopastustaulu toimi automaattisesti kuuden mittausanturin ohjaamana siten,

että kun liikennemäärä nousi tai keskinopeus laski alle sovitun arvon yhdenkin mittauspisteen kohdalla, opaste ohjasi liikenteen valtatieltä 4 Järvenpään eritasoliittymän kautta vaihtoehtoiselle reitille maantielle 140. Jos myös vaihtoehtoinen reitti ruuhkautui tai uhkasi ruuhkautua, muuttuva opaste kertoi molempien teiden ruuhkautuneen eikä ohjannut liikennettä erikseen kummallekaan reitille. Järjestelmä myös muutti nopeusrajoituksen Järvenpään eritasoliittymän eteläpuolella automaattisesti arvosta 100 km/h arvoon 80 km/h, kun reittiopastus oli päällä. Moottoritien rakentamisen jälkeen järjestelmä ei ole enää ollut käytössä. (Luku 6.4.1 perustuu viitteeseen Alppivuori ym. (1995).)

Alppivuori ym. (1995) selvittivät reittiopastusjärjestelmän vaikutuksia ennen-jälkeen-tutkimuksella vuosina 1993 ja 1994. Liikennettä kuvattiin mittauksissa kolmella videokameralla, joista kaksi oli valtatiellä 4 ja yksi vaihtoehtoisella reitillä maantiellä 140. Lisäksi jononmuodostusta seurattiin ylimääräisellä kameralla. Liikennemääriä mitattiin myös järjestelmään kuuluvien automaattisten mittausasemien avulla.

Juhannusliikenteessä valtatieltä 4 vaihtoehtoiselle reitille vaihtavien ajoneuvojen osuus kasvoi järjestelmän asentamisen myötä vähintään 5 - 8 prosenttiyksikköä. Elokuisen viikonloppuruuhkan aikana poistumisprosentin laskettiin olleen 5 - 20 prosenttiyksikköä suurempi reittiopastuksen ollessa päällä kuin ilman sitä. Reittiopastuksen päällä olemisen vaikutus näytti jatkuvan joissain tilanteissa vielä pitkään, vaikka ohjaus oli jo kytketty pois päältä. Syyskuisen perjantain aikana poistumisprosentti oli 0 - 8 prosenttiyksikköä suurempi silloin, kun reittiopastus oli päällä, verrattuna tilanteeseen ilman opastusta. Haastattelututkimuksessa noin neljännes vaihtoehtoista reittiä ajavista ilmoitti maantietä 140 ajamisen syyksi reittiopastuksen.

Reittiopastus aiheutti jonkin verran ei-toivottua ajokäyttäytymistä kuten sen, että moottoritien pientareelle pysähdyttiin ja peruutettiin, jotta päästiin rampille, rampille jo siirtynyt autoilija palasi takaisin moottoritiele, ohituskaistalta siirryttiin oikealle kaistalle ahtaaseen väliin, jotta päästiin rampille tai rampilta tulevat hitaat ajoneuvot jatkoivat kiihdytyskaistan jälkeen pientareella ajaen, kunnes pääsivät liittymään moottoritien liikenteeseen.

6.4.2 HOPES-projektin tuloksia

Drive II:een kuuluvassa HOPES-projektissa on selvitetty liikenteen häiriöistä varoittavan järjestelmän vaikutuksia. Tämän kaltaisen järjestelmän tarkoituksena on varoittaa tienkäyttäjää edellä olevista vaaratilanteista. Kun tienkäyttäjä on saanut tiedon häiriöstä, hänen oletetaan alentavan nopeuttaan, kasvattavan väliä edellä ajavaan ja parantavan tarkkaavaisuuttaan yleisesti tai, milloin mahdollista, muuttavan reittiä välttääkseen häiriökohdan. Kun tienkäyttäjä saapuu ongelma-alueelle, hänen oletetaan olevan paremmin valmistautunut välttämään mahdolliset onnettomuustilanteet, joita esimerkiksi shokkiaallot aiheuttavat. Näiden muutosten pitäisi ihannetapauksessa parantaa liikenteen sujuvuutta tasoittamalla liikennevirtaa ja siirtämällä tienkäyttäjää paremmille reiteille. (Luku 6.4.2 perustuu viitteeseen Kulmala ym. (1995).)

Tutkimuksessa kävi ilmi, että suurta osaa onnettomuuksista voidaan onnettomuustyyppin ja onnettomuuden syyn perusteella pitää sellaisina, että ne olisi mahdollisesti voitu välttää varoittamalla kuljettajaa liikenteen häiriöistä. On kuitenkin huomattava, että osa ongelmista liittyy tieympäristöön.

Muuttuvien opasteiden viestityypin vaikutusta selvitettiin simulaattorikokeen avulla. Kun häiriön syynä oli ruuhka, muuttuvien opasteiden kautta varoituksen saaneet tienkäyttäjät alensivat nopeuttaan viestityypistä riippumatta merkittävästi aikaisemmin kuin vertailuryhmä, joka ei saanut varoitusta. Nopeuden hajonnassakaan ei ollut eroa eri viestityyppien välillä. Koska yhden autoilijan hyvin myöhään aloitettu ja voimakas jarrutus vaikuttaa myös muiden turvallisuuteen, jokaiselta koekuljettajalta mitattiin minimietäisyys ruuhkaan. Ryhmien välillä ei havaittu merkitseviä eroja.

Kun häiriön syynä oli onnettomuus, tästä varoituksen saaneet kuljettajat alensivat nopeuttaan aikaisemmin ja enemmän kuin vertailuryhmä. Opaste, jossa tienkäyttäjille annettiin häiriötyypin ja sijainnin lisäksi neuvo vaihtaa kaistaa, johti hie-
man korkeampiin nopeuksiin kuin opasteet ilman tätä neuvoa. Kyseisen opasteen nähneiden ja vertailuryhmän kuljettajien nopeus vaihteli merkittävästi vähemmän kuin muiden ryhmien. Kaistanvaihto-ohjeen saaneet kuljettajat vaihtoivat kaistaa merkittävästi aikaisemmin kuin muut.

Kun liikenteenhäiriön syynä oli tietyö, kuljettajat, jotka näkivät opasteen, jossa oli ainoastaan teksti "varoitusta" tai "varoitusta, tietyö", ajoivat merkittävästi hitaammin kuin vertailuryhmä. Vertailuryhmän nopeuksien hajonta oli kuitenkin merkittävästi alhaisempi kuin "varoitusta"-viestin nähneiden kuljettajien. Jälleen opaste, jossa tienkäyttäjille annettiin häiriötyypin ja sijainnin lisäksi neuvo vaihtaa kaistaa, sai kuljettajat vaihtamaan kaistaa huomattavasti aikaisemmin kuin muut ryhmät. "Varoitusta"-viestin nähneet kuljettajat vaihtoivat kaistaa myöhemmin kuin muut.

Saadut tulokset eivät tukeneet oletusta, että mitä yksinkertaisempi viesti sitä suurempi vaihtelu kuljettajien käyttäytymisessä verrattuna yksilöidympään viestiin. Kaikentyyppisillä varoituksilla oli positiivinen vaikutus kuljettajien käyttäytymiseen.

6.4.3 Hollannissa tehty ajosimulaattoriin perustuva tutkimus

Tutkimuksessa selvitettiin ajosimulaattorin avulla, kuinka erilaiset muuttuvissa opasteissa esitetyt ruuhkaa koskevat viestit vaikuttavat kuljettajien reitinvalintaan. Testikuljettajien piti simulaattoriajon aikana valita joko normaali reitti, jolla oli vaihtelevantasoista ruuhkaa, tai vaihtoehtoinen reitti. Tiedot liikennetilanteesta esitettiin kolmella eri tavalla: 1) ruuhkan pituutena (km), 2) viivytysinä (min) verrattuna normaaliin matka-aikaan ja 3) matka-aikoina (min). Tiedon luotettavuuden tasoa vaihdeltiin korkeasta keskimääräiseen ja matalaan. (Luku 6.4.3 perustuu viitteeseen Janssen & van der Horst (1993).)

Aikaisemmissa haastattelututkimuksissa on käynyt ilmi, että tienkäyttäjät haluavat ruuhkaa lähestyessään mielellään kuvailevia liikennetietoja. Tulokseksi tuli, että tienkäyttäjien mielestä parhaita olivat matka-ajasta tai viivytyksistä kertovat

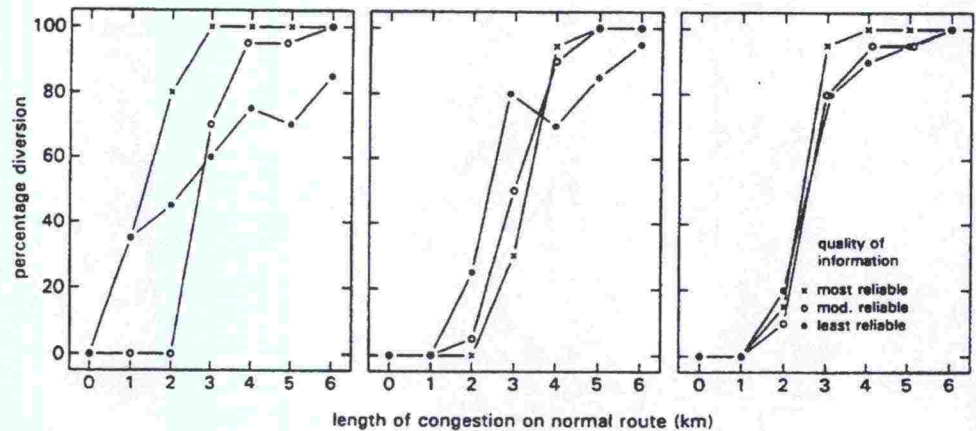
tiedot. Haastattelututkimusten tulokset eivät kuitenkaan välttämättä kerro totuutta, koska ensinnäkin haastatteluissa käsitellään vain yhtä ainoaa reittiä, toiseksi ne käsittelevät hypoteettisia tilanteita eivätkä todellista käyttäytymistä ja kolmanneksi koska niissä ei käsitelty annetun tiedon luotettavuutta.

Simulaattorijon aluksi kuljettajille kerrottiin heidän lähtö- ja määräpaikkansa sekä matkaan käytettävissä oleva maksimiaika. Kuljettajat saattoivat tämän jälkeen valita lähtevätkö he määräpaikkaansa kehätietä myötä- vai vastapäivään, kun tiedossa oli, että vapaan virran matka-aika oli myötäpäivään 7 minuuttia ja vastapäivään 12. Kokeen aikana kuljettaja ajoi lähtöpaikasta siihen pisteeseen, jossa päätös reitinvalinnasta piti tehdä. Tämän jälkeen ajo lopetettiin ja simulaattori kertoi saapumisajan. Kokeessa ei ollut mukana muuta liikennettä.

Ruuhkan oletettiin olevan myötäpäivään ajettaessa yhdestä kuuteen kilometriin matkalla. Ruuhkassa matkanopeuden oletettiin olevan 23 km/h, kun se oli muuten 100 km/h. Ruuhkasta aiheutui siis 2 - 12 minuutin viivytys. Vastakkaisen suunnan oletettiin olevan koko ajan ruuhkaton. Ruuhkasta kertovan tiedon luotettavuuden tasoa vaihdeltiin. Tieto oli luotettavaa, kun matka-ajan keskihajonta oli 1,4 minuuttia, keskinkertaista, kun keskihajonta oli 2,5 minuuttia ja epäluotettavaa, kun keskihajonta oli 3,0 minuuttia.

Lopullinen matka-aika ei ollut riippuvainen nopeudesta, jota kuljettaja ajoi neljän kilometrin koejaksolla. Matka-aika määriteltiin muuttuvien opasteiden näyttämän informaation, tiedon luotettavuuden ja kuljettajan tekemän reittivalinnan funktiona. Perille tuloaikojen jakauma määriteltiin siten, että vaihtoehtoinen reitti muodostui käyttäjäoptimaaliseksi, kun ruuhkan pituus oli vähintään kaksi kilometriä, oli tiedon luotettavuus mikä hyvänsä. Myöhästymisestä sakotettiin.

Kuva 34 esittää vaihtoehtoiselle reitille vaihtaneiden ajoneuvojen osuuden. Luotettavuudella näyttää olevan huomattava vaikutus reitinvalintaan, kun liikennetiedot annetaan ruuhkan pituutena. Tällä informaation antotavalla vaihtoehtoiselle reitille siirtyneiden osuus ei yllä sataan prosenttiin, vaikka ruuhka on pahin mahdollinen, jos tiedon luotettavuus on huono. Kun liikennetiedot annetaan matka-aikoina tai viivytyksinä, tiedon luotettavuudella ei ole vastaavaa vaikutusta, vaikka vaihtoehtoisen reitin valitsevien osuus kasvaakin hitaasti, kun tiedon luotettavuus on huono.



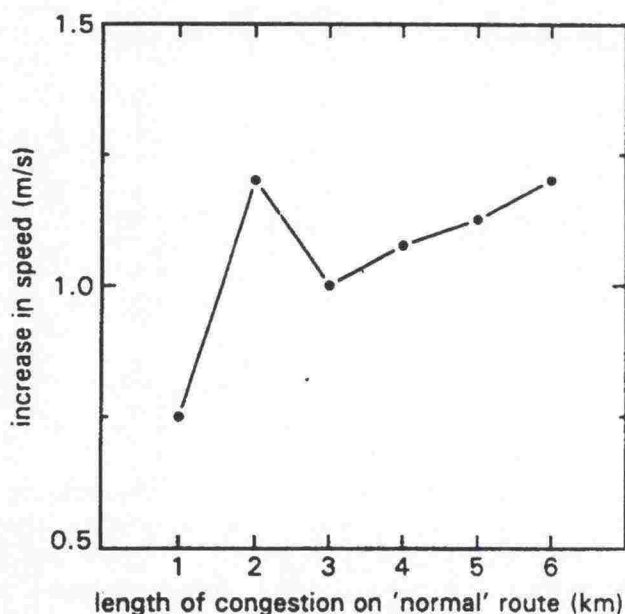
Kuva 34. Vaihtoehtoiselle reitille siirtyneiden ajoneuvojen osuus ruuhkan pituuden funktiona kullakin liikennetietojen luotettavuustasolla (x = luotettava, o = keskinkertainen ja • = epäluotettava) ja esittämistavalla (vasemmalla: ruuhkan pituus, keskellä: viivytys ja oikealla: matka-aika) (Janssen & van der Horst 1993).

Kuvan 34 tuloksia voidaan tulkita myös siltä kannalta, noudattivatko kuljettajat käyttäjäoptimaalista strategiaa (valita vaihtoehtoinen reitti, kun ruuhkan pituus ylitti 2 km). Tulokset on koottu taulukkoon 14. Kun liikenneinformaatio annetaan odotettavissa olevina matka-aikoina, kuljettajat valitsevat useimmin käyttäjäoptimaalisen strategian eikä tiedon luotettavuus vaikuta tähän. Kun tieto annetaan viivytyksinä, tulokset ovat kohtalaisia eivätkä myöskään ole riippuvaisia tiedon luotettavuudesta. Mutta kun tieto annetaan ruuhkan pituutena, tulokset ovat käyttäjäoptimin kannalta heikkoja silloin, kun tieto on ollut epäluotettavaa.

Taulukko 14. Käyttäjäoptimaalista strategiaa noudattaneiden osuudet (%) informaation antotavan ja tiedon luotettavuuden mukaan (Janssen & van der Horst 1993).

Informaation antotapa	Luotettavuus		
	Korkea	Keskinkertainen	Alhainen
Ruuhkan pituus	81	93	68
Viivytys	81	89	84
Matka-aika	97	93	91

Ajonopeuden havaittiin nousevan 1,05 m/s viimeisen 200 metrin matkalla, kun muuttuva opaste kertoi liikenteen olevan ruuhkaista. Kuva 35 esittää nopeuden nousun ruuhkan pituuden funktiona. Tulokset olivat tilastollisesti merkitseviä. Tavalliselta reitiltä poikkeamiseen käytetyn erkanemisrampin etäisyydellä, muuttuvan opasteen sijainnilla tai tavalliselta reitiltä poikkeamispaikalla ei tuntunut olevan vaikutusta asiaan.



Kuva 35. Ruuhkan pituuden ja nopeuden kasvun välinen riippuvaisuus verrattuna ruuhkattomaan tilanteeseen (Janssen & van der Horst 1993).

Janssenin & van der Horstin (1993) saamat tulokset osoittavat, että sillä, miten liikenneinformaatio annetaan, sekä tiedon luotettavuudella on vaikutusta siihen, poikkeako kuljettaja tavalliselta reitiltä vai ei. Kuten oli odotettavissakin, mitä huonommalta liikennetilanne vaikuttaa, sitä useammin kuljettaja valitsee vaihtoehdoisen reitin. Tiedon antomuoto ja luotettavuus vaikuttavat kuitenkin kuljettajan päätökseen etenkin silloin, kun tieto annetaan ruuhkan pituutena. Tähän voi olla syynä se, että kuljettajan on helpompi mieltää käyttäjäoptimi, kun puhutaan matka-ajasta tai viivytyksistä, verrattuna siihen, että liikenneolosuhteista kerrotaan ruuhkan pituutena.

Ajonopeuden tarkastelun perusteella havaittiin, että kun muuttuvat opasteet kertoivat ruuhkasta, kuljettajat nostivat hieman nopeuksiaan (keskimäärin 3,8 km/h). Tämä voidaan tulkita yrityksenä kompensoida edessä olevat viivytykset. Tätä oletusta tukee se, että nopeus nousi sitä enemmän, mitä pahempi ruuhka oli odotettavissa.

6.4.4 Muita hollantilaisia tuloksia

Kraan ym. (1998) ovat tehneet yhteenvedon selvityksistä, joissa on tutkittu Amsterdamin alueen muuttuvien opasteiden vaikutuksia liikenteeseen. Elokuussa 1997 Amsterdamin alueella oli 18 muuttuvaa opastetta, joista 11 antaa tietoja liikenteen häiriöistä, kuten onnettomuuksista ja tietöistä, ja loput liittyvät dynaamiseen reittiohjaukseen. Nämä opasteet antavat tietoja ruuhkasta ja ne on sijoitettu sellaisiin liittymiin, joissa voi valita kahden vaihtoehdoisen reitin välillä. Ruuhkatiedot annetaan jononpituuksina molempiin suuntiin. (Luku 6.4.4 perustuu viitteeseen Kraan ym. (1998).)

Tutkimuksen päätarkoituksena oli selvittää seitsemän uusimman muuttuvan opasteen vaikutukset. Tutkimuksessa selvitettiin mm. käyttäjien mielipiteitä muuttuvista opasteista ja opasteiden vaikutuksia liikennevirtaan. Käyttäjien mielipiteitä selvitettiin haastattelututkimuksen avulla. Mielipiteitä kysyttiin esimerkiksi opasteiden käyttökelpoisuudesta, luotettavuudesta ja ymmärrettävyydestä sekä siitä, miten kuljettaja reagoi opasteiden viesteihin. Järjestelmän käyttäjiltä ja poliiseilta kysyttiin mielipiteitä järjestelmän luotettavuudesta. Järjestelmän vaikutuksia liikennevirtaan selvitettiin ennen-jälkeen-tutkimuksen avulla. Tutkimuksessa selvitettiin ruuhkan kestoja, liikennesuoritteita, viivytyksiä ja reitinvalintaa.

Kuljettajille tehdyn haastattelututkimuksen päätuloksia oli, että muuttuvia opasteita pidetään erittäin hyödyllisinä. Kuljettajat olivat myös sitä mieltä, että opasteet olivat erittäin selkeitä ja helposti ymmärrettäviä. Kaksi kolmasosaa piti viestejä luotettavina. Ero dynaamisen reittiopastuksen ja liikenteen häiriöistä tiedottavien opasteiden välillä ei ollut selvä.

Järjestelmän käyttäjät olivat sitä mieltä, että järjestelmä on helppokäyttöinen, mutta herkkä sähköisille häiriöille. Poliisien mukaan järjestelmän vaikutukset ovat liikenteenhäiriön sattuessa huomattavat ja opasteiden antama informaatio luotettavaa. Poliisit olivat kuitenkin sitä mieltä, ettei reittiopastus vaihtoehtoisille reiteille häiriön sattuessa toimi vielä riittävän hyvin.

Järjestelmän vaikutuksista liikennevirtaan tehdyn tutkimuksen perusteella havaittiin, että ruuhkan määrä ja vaihtelu ovat vähentyneet järjestelmän käyttöönoton myötä. Matka-ajasta on siis tullut luotettavampi. Liikennesuorite on puolestaan kasvanut. Edellä mainitun perusteella yhdessä vähentyneen ruuhkan kanssa voidaan siis sanoa, että liikenneverkon käyttöaste on parantunut. Viivytyksiä tarkastelemalla voidaan huomata, että järjestelmä on parantanut liikenteen sujuvuutta iltaruuhkan aikaan kaupungin itäosassa ja aamulla länsiosassa. Muutokset viivytyksissä eivät olleet erityisen suuria. Myöskään muutokset reitinvalinnassa eivät olleet suuria, mutta erot olivat kuitenkin merkitseviä. Tulokset vahvistivat sen, että mitä pidemmästä jonosta opaste kertoi, sitä pienempi osa autoilijoista valitsi ruuhkaisemman reitin.

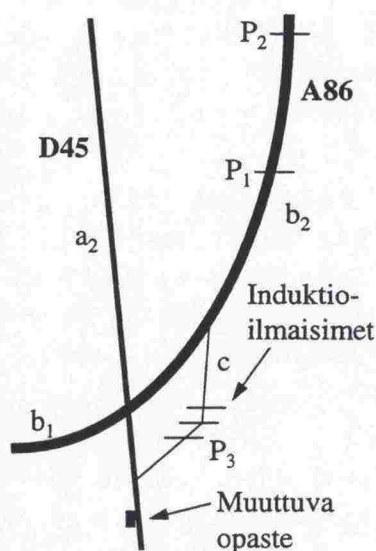
6.4.5 Pariisin SIRIUS-järjestelmän avulla tehty kenttätutkimus

SIRIUS (Système d'Information Routière Intelligible aux Usagers) on suurin kaupunkialueella tehty kehittyneiden liikennetietojärjestelmien ja automaattisen liikenteenhallinnan kenttäkoe Euroopassa. SIRIUS on toiminut Pariisissa joulukuusta 1992 lähtien. Se tarjoaa tienkäyttäjille reaaliaikaista liikenneinformaatiota muuttuvien opasteiden välityksellä. Järjestelmä kerää liikennetietoja videokameroiden ja 5 000 induktioilmaisimen avulla. (Luku 6.4.5 perustuu viitteeseen Yim & Ygnace (1996).)

Yim ja Ygnace (1996) tutkivat muuttuvien opasteiden vaikutusta yksittäisten linkkien liikennemääriin. Tutkimuksen kohteena oli se, ovatko liikennemäärät SIRIUS:n toimiessa merkitsevästi erilaiset kuin muulloin ja missä määrin SIRIUS vaikuttaa kuljettajien reitinvalintaan. Tarkemmin sanottuna tarkasteltavat asiat olivat, (a) muuttuuko linkin liikennemäärä merkitsevästi viestin vaihtuessa, (b) onko

eri viestien välillä eroja linkkien liikennemäärissä ja (c) kuinka kuljettajat reagoivat muuttuviin opasteisiin.

Selvityksen koealueeksi valittiin liittymisramppi, joka yhdistää päätien D45 ja moottoritien A86 (kuva 36). Autoilijat voivat valita, pysyvätkö he D45:llä välttääkseen ruuhkan moottoritiellä. Muuttuva opaste sijoitettiin D45:lle noin 300 metriä ennen A86:lle menevää ramppia. Opaste kertoi moottoritien liikenneolosuhteista koko ajan, siis myös vapaan liikennevirran olosuhteissa. Kun moottoritie oli ruuhkaantunut D45:ltä alavirtaan, tienkäyttäjät saivat muuttuvasta opasteesta tietoja jononpituudesta.

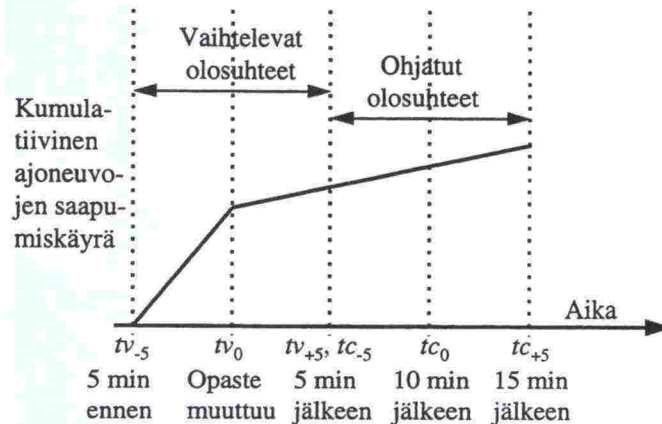


Kuva 36. Selvitykseen valittu ramppi päätien D45 ja moottoritien A86 välillä (Yim & Ygnace 1996).

Tutkimuksen tarkoituksena oli siis selvittää niiden autoilijoiden osuus, jotka muuttuvan opasteen ansiosta jäivät D45:lle välttääkseen ruuhkan. Tutkimusta varten teiden väliselle rampille asennettiin kolme induktioilmaisinta 500 metrin välein. Rampilta saatava data koostui ajoneuvomääristä, nopeuksista ja liikennetiheyksistä. Data koottiin 20 sekunnin jaksoihin.

Ilmaisindatan analysoimiseen käytettiin kahta menetelmää: tilastollista testiä, joka käytti viiden minuutin keskiarvojen eroja, ja graafista testiä, joka perustui kumulatiivisiin saapumiskäyriin minuutin jaksoissa. Tilastollisen testin tuloksia verrattiin graafisen testin tuloksiin. Saatuja tuloksia verrattiin sitten itsensä, samalta rampilta saatuaan toiseen dataan perustuvan kokeen tuloksiin.

Tilastollisessa analyysissä datasta analysoitiin lyhyen ja pitkän aikavälin olosuhteita (kuva 37). Lyhyen aikavälin olosuhteilla tarkoitetaan liikennevirran vaihteluita (kasvua tai laskua), jota tapahtuu viiden minuutin tarkastelujakson sisällä opasteen muuttumisesta. Tätä vaihtelun tilaa kutsutaan muuttuviksi olosuhteiksi. Pitkän aikavälin olosuhteilla tarkoitetaan liikennevirran muutoksia, jotka tapahtuvat ensimmäistä viittä minuuttia seuraavien kymmenen minuutin aikana opasteen muuttumisesta. Tätä vaihtelun tilaa kutsutaan ohjatuiksi olosuhteiksi. Näin saadaan selville muutokset, jotka muuttuva opaste aiheutti liikennevirtaan, ja saadaan erotettua niistä liikennevirrassa muista tekijöistä johtuvat muutokset.



Kuva 37. Vaihtelevat ja ohjatut liikenneolosuhteet (Yim & Ygnace 1996).

Oletuksena oli, että osa kuljettajista jäisi D45:lle välttääkseen ruuhkan moottoritiellä. Näin ollen rampin liikennemäärän pitäisi opasteen muuttuttua olla erisuuruinen kuin ennen opasteen muuttumista. Jos mikään muu ei muutu, voidaan olettaa, että liikennemäärä on opasteen muuttumisen jälkeen pienempi kuin ennen sitä. Vastaavasti rampin liikennemäärän voisi olettaa kasvavan, kun opaste muuttuu kertomaan lievemmästä ruuhkasta. Nollahypoteeseja tehtiin kaksi. Ensimmäinen oli, että rampin viiden minuutin keskilikennemäärä ennen opasteen muuttumista on yhtä suuri kuin opasteen muuttumista seuraavan viiden minuutin keskilikennemäärä, ja toinen, että 5 - 10 minuuttia opasteen muuttumisen jälkeen mitattu keskilikennemäärä on yhtä suuri kuin 10 - 15 minuuttia sen jälkeen mitattu.

Keskiarvojen erojen testi osoitti, että kun opaste muuttui kertomaan kasvavasta ruuhkasta A86:lla, viiden minuutin keskilikennemäärä opasteen muuttumisen jälkeen laskee 3,68 prosentilla. t-testi vahvisti viiden minuutin liikennemäärien välisen eron ennen ja jälkeen opasteen muuttumista tilastollisesti merkitseväksi 90 prosentin luottamusvälillä. Näin ollen ensimmäinen nollahypoteesi hylättiin.

Testi osoitti myös sen, että kun opaste muuttui kertomaan helpottuvasta ruuhkasta, liikennemäärissä ennen opasteen muuttumista ja sen jälkeen ei ollut havaittavissa merkitseviä eroja. Tämä johtuu siitä, että todellinen liikennemäärä vaihtelee, kun opasteen viesti muuttuu kertomaan pahan ruuhkan sijaan lievästä ruuhkasta. Tämä puolestaan viittaa siihen, että rampin kysyntä on verrannollinen kysynnän tasoon A86:lla, jolloin rampille saapuvien ajoneuvojen osuus laskee samalla, kun jono A86:lla katoaa.

Testin kolmantena tuloksena saatiin, että rampin liikennemäärän laskun voimakkuus on muuttuvan opasteen kertoman moottoritien ruuhkan asteen funktio. Sama havaittiin sekä kasvavan että vähenevän ruuhkan tapauksessa. Testin tulokset osoittivat myös sen, että raja-arvona sille, että vaihtoehtoisen reitin valinta alkaa kasvaa, on 3 kilometrin jono.

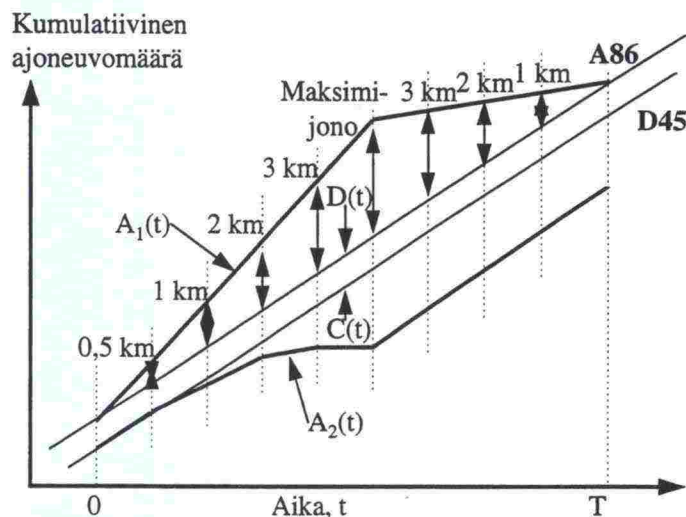
Ohjatuissa olosuhteissa kerätylle datalle tehtyä tilastollista testiä varten data jaettiin kahteen ryhmään: ensimmäinen oli 5 - 10 minuuttia ja toinen 10 - 15 minuuttia opasteen muuttumisen jälkeen kerätty data. Testi osoitti, ettei keskilikennemäärissä ollut ryhmien välillä tilastollisesti merkitseviä eroja. Kun opaste kertoi

kasvavasta ruuhkasta, myös rampin liikennemäärä kasvoi ja laski, kun opaste kertoi vähenevästä ruuhkasta. Näin ollen toinen nollahypoteesi hyväksyttiin.

Sen selvittämiseksi, miten liikennemäärä muuttuu ajan funktiona, tutkittiin kumulatiivisia ajoneuvojen saapumiskäyriä viideltä minuutilta ennen opasteen muuttumista ja 15 minuutilta sen jälkeen. Kullekin ruuhkan eri asteelle määriteltiin omat käyränsä. Kun oletettiin, että rampille saapuvien ajoneuvojen aikaväli on vakio (siis sama kuin sen välityskyky), kun liikennettä on paljon, rampille saapuvien ajoneuvojen osuus voidaan määritellä suhteessa tähän vakioon. Data viittasi tulokseen, että osuus on suunnilleen sama kuin välityskyky, kun jononpituus oli 0,5 km, ja pienempi kuin välityskyky, kun jononpituus oli vähintään 1 km. Kun opaste kertoi vähintään 3 kilometrin ruuhkasta, osuus oli selvästi alle välityskyvyn. Datat mukaan rampille saapuvien ajoneuvojen osuus oli suhteellisen vakio ohjatuissa olosuhteissa.

Tehdyt tilastolliset ja graafiset testit viittasivat siihen, että liittymisrampin liikennemäärä on suoraan verrannollinen moottoritien liikennemäärään. Kun moottoritien liikennemäärä siis kasvaa, kasvaa rampin liikennemäärä ja päinvastoin. Tilastollinen testi ei kuitenkaan vahvista väitettä, koska rampille saapuvien ajoneuvojen määrä pysyi vakiona. Tämä puolestaan viittaa siihen, että moottoritielle halua-
vien ajoneuvojen määrän kasvu on suunnilleen yhtä suuri kuin opasteen antaman ruuhkavaroituksen takia vaihtoehtoisen reitin valinneiden määrä.

Yim % Ygnace (1996) halusivat ajoneuvojen saapumiskäyriä analysoimalla selvittää A86:n ja D45:n välisen linkin liikennemäärän suuruuden riippuvaisuus an-
netuista ruuhkatiedoista. Kuvassa 38 on esitetty keskimääräinen ajoneuvojen saapumiskäyrä suhteessa opasteen antamiin ruuhkatietoihin. Selvityksen tulok-
sena oli, että muuttuvat opasteet vaikuttavat kuljettajiin tehokkaimmin silloin, kun ruuhka oli kasvamassa. Kun ruuhka on helpottamaan päin, vaikutus ei ole yhtä suuri. Alustavat tulokset viittaavat siihen, että vaihtoehtoisen reitin valitsevien kuljettajien osuuden ja ruuhkan asteen välinen riippuvaisuus on lineaarinen: kun ruuhka pahenee, vaihtoehtoisen reitin valitsevien osuus kasvaa.



Kuva 38.

A86:lle ja D45:lle saapuvien ajoneuvojen määrän välinen riippuvaisuus. Kuvassa $A_1(t)$ on ajoneuvojen saapumiskäyrä A86:n pisteessä P_1 ja $A_2(t)$ D45:n pisteessä P_3 , $D(t)$ on ajoneuvojen saapumiskäyrä A86:n pisteessä P_2 ja $C(t)$ rampin välityskykyä kuvaava käyrä. Pisteet P_1 , P_2 ja P_3 on määritelty kuvassa 36. (Yim & Ygnace 1996.)

Tehdyn selvityksen päätuloksia olivat siis, että (a) todisteet viittaavat siihen, että muuttuvat opasteet voivat vaikuttaa merkittävästi ajoneuvojen reitinvalintaan, (b) muuttuvien opasteiden vaikutus on suurimmillaan, kun opasteet kertovat kasvavasta ruuhkasta, (c) muuttuvien opasteiden vaikutus kuljettajiin on aamuruuhkan aikana voimakkaampi kuin iltaruuhkan aikana, (d) vaihtoehtoiselle reitille siirtyvien osuuden ja ruuhkan asteen välillä on läheinen riippuvaisuus ja (e) on mahdollista mitata muuttuvien opasteiden vaikutusta induktioilmaisimilla käyttämättä tietokantaa.

Tilastolliset testit osoittivat, että 3 km on jononpituuden raja-arvo sille, että merkittävä osa autoilijoista valitsee vaihtoehtoisen reitin. Graafisen analyysin avulla saatiin selville, että 4 km jonosta kertova viesti alensi rampin liikennemäärää 30 prosenttiin alle välityskyvyn, 3 km jonosta kertova viesti 15 prosenttia, 2 km jonosta kertova viesti 10 prosenttia ja 1 km jonosta kertova viesti 7 prosenttia. Muuttuvalla opasteella, joka kertoi 0,5 km jonosta, ei ollut juuri lainkaan vaikutusta liikennemäärään.

6.4.6 SP-tutkimus kuljettajien reaktioista muuttuviin opasteisiin

Wardman ym. (1997) halusivat laajentaa Stated Preference -tutkimuksen avulla jo tehtyjä tutkimuksia muuttuvien opasteiden vaikutuksista ja selvittää, voidaanko reitinvalintasimulaattorin avulla saadut tulokset toistaa ja näin ollen korvata halvemmalla SP-tutkimuksella. (Luku 6.4.6 perustuu viitteeseen Wardman ym. (1997).)

SP-tutkimuksen hyvä puoli on sen kyky hallita valintatapahtumaa ja riippumattomia muuttujia, jotka tulevat kysyntämalliin. Nämä ominaisuudet ovat erityisen tärkeitä arvioitaessa muuttuvien opasteiden vaikutuksia kuljettajien reitinvalintaan.

SP-tutkimuksen heikkous on se, etteivät yksilöt ole sitoutuneita toimimaan SP-vastaustensa mukaisesti. Annettujen vastausten on havaittu kuitenkin vastaavan riittävällä tarkkuudella kuljettajien käyttäytymistä. SP-menetelmä valittiin tutkimukseen siksi, että sen avulla toivottiin voitavan määritellä kuljettajien suhtautuminen hyvin moneen erilaiseen muuttuvaan opasteeseen ilman ulkoisien häiriöiden vaikutusta.

SP-koe perustettiin noin 34 km pituiseen matkaan Warringtonista Manchester Cityn keskusta. Koereitti valittiin sillä perusteella, että sen avulla saatettiin tutkia reitinvalintaa hyvin erityyppisten reittien ja olosuhteiden välillä ja näin ollen sitä, kuinka kuljettaja painottaa eri vaihtoehtoja. Warringtonissa asuvaa vastaajaa pyydettiin oletamaan, että hän on ajamassa Manchester Cityn keskusta moottoritietä M62 pitkin lauantai-iltapäivänä ja että, kun hän saapuu M62/M6-liittymään, hän näkee muuttuvan opasteen, joka kertoo liikenneolosuhteista edempänä reitillä.

Reitinvalinnan selvittämisessä vastaajalle näytettiin valokuvaa, joka esitti muuttuvaa opastetta päätöksentekoaalueella tuulilasin läpi kuvattuna. Liikennetiedot annettiin viivytyksinä kolmella tai neljällä vaihtoehtoisella reitillä sekä viivytyksien syyt. Valokuvan lisäksi liikennetiedot annettiin myös kirjallisessa muodossa. Kun liikenneolosuhteet oli näin kerrottu, vastaajaa pyydettiin kertomaan, minkä reitin hän valitsisi. Vaihtoehtoisista reiteistä kaksi oli (3+3)-kaistaisia moottoriteitä (M62 ja M56), joilla oli nopeusrajoituksena 112 km/h, yksi oli (2+2)-kaistainen päätie (A580) samalla nopeusrajoituksella ja viimeinen vaihtoehto oli kaksikaistainen päätie (A57), jolla on nopeusrajoituksena 96 km/h. Noin puolet kustakin reitistä kulkee kaupunkialueen halki, jolloin nopeusrajoituksena on 48 km/h.

Vastaajalle annettiin tietoja paikallisista liikenneolosuhteista sekä ajettulla moottoritiellä että sen poistumisrampilla, odotettavissa olevista viivytyksistä vaihtoehtoisilla reiteillä (5, 10, 20, tai 30 minuuttia, teksti "mahdollisia viivytyksiä" tai "pitkiä viivytyksiä") sekä näiden viivytysten syyt (ei syytä, onnettomuus, ruuhka tai tietyö). Vastaajan oletettiin tekevän ratkaisunsa annetun informaation perusteella.

Vastaajalla oletettiin olevan oma käsityksenä vaihtoehtoisista reiteistä, minkä takia heitä pyydettiin arvioimaan normaali matka-aika lauantai-iltapäivänä neljälle vaihtoehtoiselle reitille. Keskimääräiset vastaajien arvioimat matka-ajat olivat M62:lle 27 min, M56:lle ja A580:lle 37 min sekä A57:lle 39 min. Vastaajilta kysyttiin myös sitä, kuinka suureksi he arvioivat viivytyksen kullakin reitillä silloin, kun jonoja oli havaittavissa. Kullekin vastaajalle tehtiin vain kahdeksan kysymystä, jotta voitiin välttää väsymisen vaikutus tuloksiin, ja vaihtoehdot valittiin siten, ettei niissä ollut mahdottomia yhdistelmiä. Viivytyksiä, joiden syitä ei kerrottu, ei vertailtu muihin vaihtoehtoihin.

Tulokset osoittavat, että kuljettajat valitsevat herkimmin vaihtoehtoisen reitin, kun viivytyksen syynä on onnettomuus. Se, ettei syytä kerrottu lainkaan, oli vaihtoehtoista tehottomin. Tapauksissa, että viivytyksen syynä oli ruuhka tai tietyö, opasteen vaikutus oli hyvin samankaltainen.

Kuljettajat tulkitsivat opasteen "mahdollisia viivytyksiä" kuvaavan viivytystä, joka vastaa 10 - 31 minuutin normaalia matka-aikaa viivytyksen syystä riippuen. Jälleen, kun viivytyksen syynä oli onnettomuus, viivytyks tulkittiin pisimmäksi ja sil-

loin, kun syytä ei kerrottu, lyhimmäksi. On huomattavaa, että kun syyksi ilmoitetaan tietyö, viivytys arvioidaan suhteellisen lyhyeksi, lyhyemmäksi kuin ruuhkan aiheuttama viivytys, vaikka näiden oletettiin olevan samaa suuruusluokkaa. Tähän saattaa olla syynä merkin liian herkkä käyttö, eli mahdollisista ruuhkista ilmoitetaan jo silloin, kun ruuhkaa ei vielä ole.

Opasteen "pitkiä viivytyksiä" kuljettajat tulkitsivat kuvaavan viivytystä, joka vastaa 35 - 47 minuutin normaalia matka-aikaa viivytyksen syystä riippuen. Kaikissa neljässä tapauksessa viivytykset olivat pidempiä kuin "mahdollisia viivytyksiä" -opasteella ja jälleen viivytys tulkittiin suurimmaksi, kun sen syynä oli onnettomuus.

Kuljettajat arvioivat näkyvien jonojen vaikutuksen viivytykseen yllättävän pieneksi. Tähän arvioitiin syyksi se, etteivät kuljettajat ymmärtäneet SP-tutkimuksessa täysin jonojen merkitystä. Kun selvitettiin viivytyksen pituuden kasvamisen vaikutuksia, saatiin selville, että kuljettajat tulivat sitä herkemmiä viivytykselle mitä suuremmaksi se kasvoi. Ajan arvostus myös kasvoi viivytyksen kasvaessa.

Kun tutkittiin muiden tekijöiden vaikutusta reitinvalintaan, havaittiin, että nuoret (alle 35-vuotiaat) kuljettajat valitsivat vaihtoehtoisen reitin vanhempia harvemmin. Sukupuolen vaikutusta tutkittaessa havaittiin, että naiset eivät ole yhtä herkkiä viivytyksen kestolle kuin miehet eivätkä naiset halunneet yhtä mielellään poiketa tutulta reitiltä. Kuljettajat, jotka eivät tunteneet vaihtoehtoista reittiä, eivät yleensä halunneet vaihtaa sille. Kuljettajat, jotka eivät luottaneet muuttuvien opasteiden antamiin liikennetietoihin, antoivat näkyvien jonojen vaikuttaa päätökseensä enemmän kuin muut kuljettajat.

6.4.7 Simulaattoritutkimus muuttuvien opasteiden vaikutuksesta reitinvalintaan

Yang ym. (1993) selvittivät kuljettajien reitinvalintakäyttäytymistä, kun heille annettiin informaatiota liikennetilanteesta. Selvitys tehtiin tietokonesimulaattorin avulla. Koekuljettajien tehtävänä oli minimoida matka-aikansa päättämällä, milloin noudattaa liikenneinformaatiojärjestelmän antamia neuvoja ja milloin ei. Koekuljettajille kerrottiin myös, että heidän reaktioaikansa mitattiin, eli että heidän pitäisi tehdä päätöksensä mahdollisimman nopeasti - kuitenkin niin, että he ehtivät tehdä hyvän päätöksen. Koekuljettajat ajoivat simulaattoria 32 eri koepäivänä, joina heidän piti valita kahdesta eri reittivaihtoehdosta (valitsevatko he moottoritien vai sivutien). Koekuljettajille myös kerrottiin, ettei liikenneinformaatiojärjestelmä toimi aina moitteettomasti. (Luku 6.4.7 perustuu viitteeseen Yang ym. (1993).)

Kunkin kokeen jälkeen koekuljettajilta kysyttiin, olivatko he tyytyväisiä reitinvalintaansa. Samalla heiltä pyydettiin arvio matka-ajastaan. Koe tehtiin siten, että osa koekuljettajista sai ja osa ei saanut palautetta valintansa oikeaan osumisesta. Koekuljettajia oli 20.

Kuljettajien reitinvalintamekanismia analysoitiin neuroverkon avulla. Neuroverkko rakennettiin siten, että syötekerroksen elementit vastasivat erilaisia liikennetietoja ja tulostekerroksen ainoa elementti antoi vastaukseksi, kumman reitin kuljetta-

ja valitsi. Verkkoa rakennettaessa vastaus 1 tarkoitti moottoritietä ja 0 vaihtoehtoista reittiä. Kun verkkoa käytettiin reitinvalintaestimointiin, vastaus tulkittiin moottoritieksi, kun se oli vähintään 0,5, ja muulloin vaihtoehtoiseksi reitiksi.

Mallissa kahta asiaa pidettiin reitinvalinnassa tärkeinä: liikenneinformaatiojärjestelmän tarjoamia tietoja ja kuljettajan tekemiä havaintoja liikenneolosuhteista vaihtoehtoisilla reiteillä. Sen ottamiseksi huomioon, että kuljettajan kokemukset ja tiedot karttuivat päivä päivältä, analyysin syötetietoina käytettiin painotettuja kumulatiivisia keskiarvoja. Mallin syötetietoja olivat muuttuvien opasteiden näyttäminen sen hetkinen viesti, tyytyväisyys ja tyytymättömyys sivutiehen, nopeus ja viivytykset sivutiellä sekä vastaavat parametrit moottoritieltä. Jos verkon haluttiin selvittävän yksittäisen kuljettajan reitinvalintakäyttäytymisen sijaan reitinvalintaa yleensä, mallin syötetietoihin lisättiin, kuinka usein kuljettaja yleensä ajaa, sekä kuljettajan sukupuoli. Ikä jätettiin syötetietojen ulkopuolelle, koska kaikki koekuljettajat olivat suunnilleen saman ikäisiä.

Neuroverkko osoittautui luotettavaksi reitinvalintakäyttäytymisen mallintamisessa. Reitinvalintakäyttäytyminen vaihtelee kuitenkin runsaasti ajajasta toiseen sekä silloin, kun heillä on liikennetietoa apunaan, että ilman sitä. Tämä johtuu ihmisten erilaisesta kyvystä käsitellä saatua tietoa ja muodostaa ennusteita sen pohjalta sekä erilaisista aikaisemmista kokemuksista. Reitinvalintakäyttäytymisen jaetaan kolmeen osaan: tyyppi 1 kuljettajien viimeisimpien ja tätä edeltävien kokemusten yhdistelmä on optimaalinen, tyyppi 2 kuljettajat korostavat viimeisimpien kokemusten tärkeyttä ja tyyppi 3 kuljettajien reitinvalintapäätökset eivät niinkään perustu aikaisempiin kokemuksiin vaan informaatiojärjestelmän tarjoamiin tietoihin.

Neuroverkkomallin avulla saatiin selville, että suurin osa kuljettajista perusti reitinvalintapäätöksensä viimeisimpiin kokemuksiinsa ja että henkilökohtaisilla ominaisuuksilla oli suuri vaikutuksensa valinnassa. Ajokokemuksella vaikutti olevan suurempi vaikutus moottoritien valintaan kuin sivutien. Tulokset myös osoittivat, että kuljettajien kyky muistaa aikaisemmat kokemuksensa vaihtelee. He myös päivittävät käsityksiään ja tietojaan eri tavoin.

7 Yhteenveto

7.1 Tutkimuksen tarkoitus

Selvityksen tarkoituksena on tutkia korkealuokkaisten väylien ja kaksikaistaisten pääteiden automaattisia liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmiä, näiden tietotarpeita, vaikutuksia ja uusia sovelluksia. Tavoitteena on selvittää, kuinka saada kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopiva järjestelmä.

Nyt tehdyn kirjallisuusselvityksen tavoitteena on tehdä katsaus aihepiiriin, analysoida tutkimuskokonaisuuden keskeisten osa-alueiden ongelmia ja ratkaisuvaihtoehtoja sekä muodostaa omia johtopäätöksiä.

7.2 Automaattisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien liikennetietotarpeet

Automaattiset liikenteenohjausjärjestelmät keskittyvät johonkin tiettyyn tieverkon osaan ja pyrkivät optimoimaan liikennesuoritetta paikallisella tai alueellisella tasolla. Liikenteenohjausjärjestelmät tarvitsevat liikenteestä hyvin tarkkoja ja ajantasaisia tietoja. Liikennetietojärjestelmien tehtävänä taas on auttaa tienkäyttäjää optimaalisen reitin valinnassa. Jotta liikennetietojärjestelmä voi tarjota useille ajoneuvoille yhtä aikaa tietoa optimaalisesta reitistä, sen on saatava liikennetiedot koko matkalta lähtöpisteen ja määräpaikan välillä, viivytykset tavallisella reitillä, vaihtoehtoisten reittien matka-ajat sekä tietoa vaihtoehtoisista kulkutavoista lähtöhetkellä. Liikennetietojärjestelmälle riittävät siis harvempaan tehty päivitykset, mutta se tarvitsee tietoja laajemmalta alueelta. (Westerman 1995.)

Suurin osa automaattisista liikenteenohjausjärjestelmistä tarvitsee tietoja liikennemäärästä, pistenopeuksista, varausasteista ja jononpituuksista sekä valvontakameran kuvan ja automaattisen häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän antaman tuloksen. Erityyppisten liikennetietojärjestelmien tietotarpeet vaihtelevat enemmän, mutta tyypillisiä parametrejä ovat jononpituus, linkkikohtaiset matka-ajat, järjestelmän kohteena olevien reittien liikenteen häiriöiden, kuten tietöiden tai erilaisien tapahtumien, sijainti sekä alkamis- ja loppumishetki, mahdolliset kiertotiet ja tiedot liikenteelle aiheutuvista viivytyksistä. (Kulmala & Luoma 1998.)

7.3 Liikenteen mittaamismenetelmät

7.3.1 Kiinteät ilmaisimet

Selvityksessä on esitelty kiinteistä ilmaisimista pneumaattinen letkuilmaisoin, koaksiaali-ilmaisoin, infrapunailmaisoin, tutkailmaisoin, ultraääni-ilmaisoin, akustinen ilmaisoin, induktioilmaisoin, magnetometri sekä videoilmaisoin. Näistä pneumaattinen letkulaskuri ja koaksiaalikaapeli ovat tekniikoina vanhentuneita ja kelpaavat vain tilapäisiin mittauksiin. Infrapunailmaisimet ovat herkkiä saasteille, luonnonvalon muutoksille ja kosteudelle ja niiden luotettavuus on suurilla liikennemäärillä huo-

no. Tutkan ja ultraäänen avulla kerätyn datan laatu on riittävän hyvä liikenteenohjausjärjestelmille, mutta ajoneuvojen luokittelu ei ole näillä ilmaisimilla erityisen tarkkaa. Akustisesta ilmaisimesta suunnitellaan vaihtoehtoa induktioilmaisimille, mutta se on yhä kehitysasteella. Kehittyneet induktioilmaisimet täyttävät kaikki liikenteenohjauksen asettamat vaatimukset ja niitä on testattu paljon. Magnetometri toimii induktioilmaisimen tapaan. Videoilmaisimien avulla voidaan mitata monimutkaisia liikennetilanteita sekä matka-aikoja, joita ei muilla ilmaisimilla voi suoraan mitata (Westerman 1995).

Mainituista ilmaisintyypeistä vain harva kykenee tuottamaan kaikki automaattisten liikenteenohjaus- tai liikenneinformaatiojärjestelmien tarvitsemat tiedot liikenteestä (taulukko 15). Parhaiten tehtävän täyttävät induktioilmaisimien, magnetometri sekä kehittynyt videoilmaisimien. Kiinteiden ilmaisimien heikko puoli on kuitenkin se, että ne mittaavat yleensä poikkileikkauskohtaisia parametrejä, vaikka monet sovellukset tarvitsevat reaaliaikaisia linkkikohtaisia tietoja (Westerman 1995).

Taulukko 15. Automaattisille liikenteenohjaus- ja liikennetietojärjestelmille tärkeät parametrit sekä kykeneekö ilmaisintyyppi mittaamaan kyseistä suuretta.

Ilmaisintyyppi	Liikennemäärä	Pistenopeus	Varausaste	Jononpituus	Matka-aika	Huomautuksia
Pneumaattinen letkuilmaisimien	X	X				Tilapäisiin kohteisiin
Koaksiaali-ilmaisimien	X	X				Tilapäisiin kohteisiin
Infrapunailmaisimien	X		X			Huono suurilla liikennemäärillä, ei mittaa kaistoittain
Tutkailmaisimien	X	X	X	X		Ei mittaa kaistoittain
Ultraääni-ilmaisimien	X	X	X			
Akustinen ilmaisimien	X	X	X	X		Kokeiluasteella
Induktioilmaisimien	X	X	X	X		
Magnetometri	X	X	X	X		
Videoilmaisimien	X	X	X	X	X	

Suuri osa linkkidatan mittausmenetelmistä perustuu ajoneuvon tunnistamiseen kahdessa tai useammassa pisteessä tutkittavalla tiejaksolla. Ajoneuvojen tunnistaminen tehdään pääasiassa joko tunnistamalla jokainen ajoneuvo yksiselitteisesti, kuten rekisteritunnuksen tai elektronisen tunnistimen avulla, tai joko ajoneuvon fyysisien ominaisuuksien perusteella tai em. tekniikoilla siten, ettei tallennetta voi yksiselitteisesti yhdistää mihinkään tiettyyn ajoneuvoon. (Haugen 1996.)

7.3.2 Anturiajoneuvot

Koska kahden pisteen välinen matka-aika on pistenopeuksia luotettavampi liikennetilanteen kuvaaja, liikenteen seassa liikkuvat ja automaattisesti eri linkkien matka-ajat raportoivat anturiajoneuvot ovat arvokkaita tietolähteitä. Anturiajoneuvot voivat olla osa monipuolista reittiopastusjärjestelmää tai ne on voitu varustaa myös nimenomaan liikenteen monitorointia varten. (Westerman 1995.)

Anturiajoneuvon sijainnin määrittämiseen on muutama perustekniikka, joihin kaikki menetelmät perustuvat. Sijainti voidaan määrittää laskemalla kuljettu matka useissa eri suunnissa yhteen aikaisemman, tunnetun sijainnin kanssa. Estimattia voidaan parantaa sovittamalla estimoitua reittiä digitaaliseen tiekarttaan tai vahvistamalla sijainti signaaleilla, joita strategisiin paikkoihin sijoitetut lyhyen kantaman lähettimet lähettävät. Toinen perustekniikka on määrittää anturiajoneuvon sijainti samanaikaisesti vähintään kolmesta kiinteästä lähteestä tulevien signaalien viiveen perusteella. (Westerman 1995.)

Tarjontamalli vaikuttaa kysyntämallia paremmalta, kun anturiajoneuvojen penetraatioaste on alhainen. Penetraatioasteen kasvaessa kysyntämalli muuttuu paremmaksi kauempana olevien linkkien kannalta. Lähetysten välistä aikaa säättämällä kysyntämallissa voidaan saavuttaa millä tahansa penetraatioasteella sama läpäisyaste kuin tarjontamallissa pienillä penetraatioasteilla. Anturiajoneuvoilla tapahtuvan datankeruun ohjaamiseen on myös olemassa mm. seuraavanlaisia kriteereitä: tieluokka, ajoneuvotyyppi ja poikkeavat liikenneolosuhteet. (Westerman 1995.)

Matka-aikadatan keräämisen kustannukset ja toisaalta laatu riippuvat tarvittavasta anturiajoneuvojen määrästä. Näin ollen kannattaa siis estimoida pienin mahdollinen anturiajoneuvojen määrä, jolla vielä saadaan luotettavia ja tarkkoja estimateja matka-ajoista koko tarkasteltavalla liikenneverkolla. (Srinivasan & Jovanis 1996, Park ym. 1998.)

7.4 Tietojen tulkitseminen

7.4.1 Linkkidata

Liikennevirran laatua kuvataan usein liikennemäärän, liikennetiheyden ja nopeuden avulla. Liikennemäärän ja -tiheyden määritelmät ovat yksiselitteisiä, mutta nopeus vaatii lisäselvennyksiä ollakseen määritelty yksikäsitteisesti. Yleensä nopeudet jaetaan hetkellisiin pistenopeuksiin ja tielinkkiä koskeviin matkanopeuksiin. (Haugen 1996.)

Pistedatan ja linkkidatan välisiä eroja selvitettiin Norjassa kahden koelinkin avulla. Pidemmän koelinkin pistedatan ja linkkidatan välisten erojen analyysi osoittaa, että matkanopeus on stabiilimpi parametri kuin pistenopeus ja sopii täten paremmin liikenteenohjauksen tarpeisiin. Sellaisilla aikajaksoilla, joilla liikenteessä tapahtui häiriöitä, matkanopeuksissa oli vähän vaihtelua ajoneuvojen välillä ja se oli hyödyllinen liikennevirran laadun indikaattori. (Haugen 1996.)

Määritettäessä linkin liikennetiheyttä tai liikennemäärää anturiajoneuvojen tiheys voidaan estimoida anturiajoneuvojen määrän jakauman perusteella. Kaikkien ajoneuvojen tiheys saadaan laskettua anturiajoneuvojen tiheydestä penetraatioasteen avulla. Liikennemäärä saadaan estimoitua vastaavasti kuin liikennetiheys. Yhdistämällä anturiajoneuvoilta tulleet liikenneviestit tielinkki saadaan jaettua tiejaksoihin, joilla anturiajoneuvojen nopeudet ovat samansuuruisia. Näin linkin keskimääräinen matkanopeus ja -aika ovat suoraan laskettavissa. Tielinkin keskinopeus saadaan laskemalla kaikkien linkillä olevien anturiajoneuvojen matkanopeuksien keskiarvo linkin pituudella ja mittausajalla painotettuna. (Westerman 1995.)

Matka-aika voidaan määrittää myös induktioilmaisindatasta. Menetelmiä on vähintään neljä, joista ensimmäinen perustuu kahteen mittauspisteeseen, toinen kumulatiivisiin jakaumiin, kolmas liikennemäärien väliseen korrelaatioon ja neljäs ajoneuvojen "sormenjälkien" tunnistamiseen. (Westerman 1995, Pfannerstill 1991).

7.4.2 Häiriöiden havaitseminen

Automaattinen häiriöiden havaitseminen on tärkeä osa liikenteenohjausta. Se on erityisen tärkeää tunneleissa ja muissa riskipaikoissa. Tarvittavan häiriöidenhavaitsemisjärjestelmän luonne on riippuvainen häiriön määritelmästä ja liikenteen määrästä. (Bell 1994.)

Perinteiset häiriöidenhavaitsemismenetelmät etsivät häiriöitä tarkastelemalla muutoksia liikennevirtaan liittyvissä parametreissa. Perinteisissä menetelmissä ilmaisimena on yleensä induktioilmaisim. Nämä induktioilmaisimiin perustuvat menetelmät voidaan jakaa viiteen ryhmään: vertaileviin, tilastollisiin, aikasarjoihin perustuviin, tasoittaviin / suodattaviin ja liikennemalleihin perustuviin algoritmeihin. Häiriöiden havaitsemiseen on tullut myös monia uusia menetelmiä. Nämä ovat mm. videokuvan analysointi, tekoälysovellukset sekä anturiajoneuvot. (Wang & Sisiopiku 1998, Lee & Hwang 1998.)

7.4.3 Liikennetilanteen ennustaminen

Dynaamiset liikenneinformaatio- tai liikenteenohjausjärjestelmät eivät voi toimia reaktiivisesti, vaan niiden täytyy osata ennakoida liikennetilanteet ja sopeuttaa strategiansa ajoissa. Se, että järjestelmä pystyy jatkuvasti päivittämään liikennemäärä- ja matka-aikaennusteita useita minuutteja eteenpäin käyttämällä reaaliaikaista liikennedatata, on ehdoton dynaamisen liikenteenohjauksen ja liikennetietojärjestelmien toiminnan edellytys. (Smith & Demetsky 1997.)

Smith & Demetskyn (1997) tekemässä vertailussa tutkittiin kahta uutta liikenteenennustamismenetelmää, jotka perustuivat neuroverkkoon ja ei-parametrisen regressiomalliin, sekä kahta perinteistä mallia, jotka perustuivat aikaisempien tietojen keskiarvoon ja aikasarjoihin. Tulosten perusteella lähin naapuri-menetelmä havaittiin paremmaksi kuin muut. Toiseksi parhaaksi osoittautui neuroverkko ja kolmanneksi jäi keskiarvomalli. ARIMA-mallia ei voitu käyttää va-

jaalla datalla. Se oli kuitenkin hieman parempi kuin keskiarvomalli. Smith & Demetsky (1994) tekivät jo aikaisemmin vastaavanlaisen vertailun neuroverkko-, ARIMA- ja keskiarvomallin välillä. Tämän vertailun tulokset olivat hyvin samansuuntaisia.

Myös Lee ym. (1998) ovat tehneet vertailun erilaisten matkanopeuksien lyhyen aikavälin ennustamismenetelmien välillä. He vertasivat usean selittäjän regressio-, ARIMA-, neuroverkko- ja Kalman-suodatinmalleja. Myös heidän tuloksensa ovat hyvin samansuuntaisia: neuroverkko- ja Kalman-suodatinmalli tekivät tarkempia ennusteita kuin regressio- tai ARIMA-mallit.

Selvityksessä on esitelty kaksi esimerkkiä (Hobeika & Ozbay 1991 ja Stephanedes ym. 1990a) matka-aikojen tai viivytysten ennustamisesta liikenteen simuloinnin ja sijoittelun avulla. Molemmissa menetelmissä liikenne ensin sijoitellaan verkolle, suoritetaan simulointi, selvitetään viivytykset (matka-ajat) kullekin linkille, suoritetaan sijoittelu uudestaan ja niin edelleen, kunnes saavutetaan tasapaino.

Ben-Akiva ym. (1992) ovat suunnitelleet Rotterdamin liikenteenseurantajärjestelmää varten ruuhkan ennustamisjärjestelmän. Ennusteiden tekemiseen he valitsivat DYNA-DTMS-mallin, joka käyttää tietolähteinään reaaliaikaista liikennedatata, liikenteestä koottua tietokantaa sekä liikenneverkon infrastruktuuritietoja. Malli on yhdistelmä tilastollisesta liikennemallista ja dynaamisesta liikenteen sijoittelumallista.

Stephanedes ym. (1990b, Kwon 1991, Stephanedes 1991) halusivat myös kehittää moottoriteliikenteen kysynnälle ja jakautumiselle luotettavan ennustamisalgoritmin, joka tunnistaisi liikennevirran ominaisuudet reaaliajassa ja jota voitaisiin käyttää dynaamisessa liikenteenohjauksessa ja ajoneuvojen opastamisessa. Heidän mallinsa käyttää liikenteen jakauman ennustamisessa rekursiivista parametrien tunnistamista, joka perustuu laajennettuun Kalman-suodattimeen.

Ashok & Ben-Akiva (1993) ovat kehittäneet periaatteet reaaliaikaiseen aikariippuvaisten lähtöpaikka-määräpaikkamatriisien estimoimiseen ja ennustamiseen. Myös heidän ongelmansa on muotoiltu Kalman-suodattimeksi. Suodattimessa tilavektori koostuu eroista, joita lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisissä liikennemäärissä on edellisiin estimaatteihin verrattuna. Lähtöpaikka-määräpaikkaparien välisten liikennevirtojen vaihteluiden ennusteita muokataan kunkin aikajakson lopulla saatujen linkkikohtaisten liikennelaskentojen tulosten perusteella.

Matsui & Fujita (1998) taas ovat kehittäneet moottoriteiden liikennetietojärjestelmien käyttöön neuroverkkoihin ja sumeaan päättelyyn perustuvan matka-ajan ennustamismenetelmän. Mallissa ennusteen syötetietoina käytetään matka-aikaa ajoneuvon lähtöhetkellä ja tiejaksolla olevien ajoneuvojen lukumäärää. Sumeaa päättelyä varten tehtiin useita ohjaussääntöjä. Sumean päättelyn säännön jos-osa ja sitten-osa rakennettiin neuroverkkoina.

Kwon & Stephanedes (1994) ovat rakentaneet neuroverkkomallin liikennemäärien ennustamiseen moottoritien poistumisramppien automaattista liikenteenohjausta varten. Mallia verrattiin olemassa olevaan UTCS-2-malliin ja mukautuvaparametriseen malliin, joka ennustaa liikennemäärät Kalman-suodattimen avulla. UTCS-2-malli oli jokaisessa vertailussa huonoin. Mukautuvaparametrinen malli ja neuroverkkomalli tekivät vuorotellen pienimmät virheet.

Zhang ym. (1997) ovat myös kehittäneet neuroverkkoon perustuvan ennustemallin dynaamisten liikenteenohjausjärjestelmien tarpeisiin. Neuroverkko rakennettiin mallintamaan Papageorgioun laajentamaa Paynen kontinuumimallia.

7.5 Automaattisia liikenteenohjaus- ja liikennetietojärjestelmiä

Muuttuvilla opasteilla voidaan tienkäyttäjälle antaa tietoa, neuvoja ja ohjeita. Sen lisäksi, että kuljettajat saadaan käyttäytymään halutulla tavalla erilaisissa olosuhteissa, muuttuvia opasteita voidaan käyttää myös rajoittamaan kaistoille pääsyä. Opasteita voidaan näin ollen käyttää myös sellaisissa tapauksissa, joissa kaistat on varattu eri kellonaikoina eri suuntaan kulkevan liikenteen käyttöön. (Bell 1994.)

Tien yläpuolelle asennettujen muuttuvien opasteiden etuna on se, että kaikki tienkäyttäjät näkevät niiden antaman informaation. Muuttuvien opasteiden sisältämän informaation määrä on kuitenkin hyvin rajallinen, mikä johtuu sen ajan lyhydestä, jolloin tienkäyttäjä näkee opasteen. (Sodeikat 1994.)

Valtatielle 7 on rakennettu keliin ja sähkän perustuva liikenteen ohjausjärjestelmä. Sääolosuhteet vaihtelevat ohjatulla alueella usein. Järjestelmään kuuluu 97 muuttuvaa opastetta sekä 21 muuttuvaa varoitusmerkkien ja tiedotustaulujen yhdistelmää. Sää- ja keliolosuhteita tarkkaillaan kahdeksan automaattisen tiesääaseman avulla ja tiesääjärjestelmä ohjaa muuttuvia opasteita automaattisesti kulloisenkin kelitilanteen mukaan. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1995 ja 1997, Kaus-te ym. 1998.)

Muuttuvien opasteiden kokeilutieosuudella käytetään sää- ja keliolosuhteiden mukaan muuttuvien varoitusmerkkien ja tiedotustaulujen yhdistelmiä, joilla voidaan varoittaa kelistä tai muusta liikennettä haittaavasta tekijästä. Yhdistelmiä ohjataan heikoimpien ohjausjaksolla havaittujen keliolosuhteiden mukaan. (Kaakkois-Suomen tiepiiri 1997.)

Länsiväylän ruuhkavaroitus- ja kameravalvontajärjestelmän ensimmäisessä vaiheessa tiellä on 14 muuttuvaa liikennemerkkiä, lähes sata induktioilmaisinta, jotka on asennettu 17 poikkileikkaukseen, kolme seurantakameraa ja tiedonsiirtojärjestelmä. Järjestelmän tarkoitus on parantaa liikenneturvallisuutta ja samalla sujuvuutta tasoittamalla nopeuksia ja tiedottamalla ruuhkasta. Ohjaus perustuu nopeussuureen seurantaan ja kiinteisiin kynnysarvoihin. Liikennekeskuksen mielestä järjestelmä on toiminut suunnitellusti. (Uudenmaan tiepiiri 1999, Innamaa 1997.)

E18-tielle on Norjassa, Vestfoldin maakunnassa rakennettu liikennetietojärjestelmä. Alueella on kesäaikaan huomattavia välityskykyongelmia, jotka johtuvat lomaliikenteen suuresta määrästä. Liikennemäärä- ja nopeustietoja on vuoteen 1994 saakka kerätty neljässä mittauspisteessä. Vuosina 1994 ja 1995 tielle asennettiin vanhan järjestelmän rinnalle kaksi uutta järjestelmää, jotka mittaavat matka-aikoja ja muita linkkiparametreja ajoneuvojen automaattisen tunnistusjärjestelmän avulla. Järjestelmistä toinen perustuu tietullin sähköisten tunnistaiden lukemiseen ja toinen ajoneuvon fyysisiin ominaisuuksiin. (Giæver 1996.)

E18:lle asennettiin jo vuonna 1988 tienkäyttäjille liikenneolosuhteista tiedottava järjestelmä. Menetelmä perustui liikennemäärä- ja nopeustietoihin. Muuttuvia opasteita käytetään yhä. Ruuhkatietojen yhteydessä opasteissa annetaan tietoa vaihtoehtoisista reiteistä. Kesällä 1994 ryhdyttiin mittaamaan myös matka-aikoja ja viivytyksiä, mikä mahdollisti tienkäyttäjille kerrottujen liikennetietojen tarkentumisen. (Giæver 1996.)

Amsterdamin kehätielle on rakennettu automaattinen liikenteenohjausjärjestelmä, joka koostuu muuttuvista nopeusrajoituksista ja kaistansulkumerkeistä. Järjestelmä varoittaa automaattisesti takana tulevia autoja edessä olevasta hitaamasta liikennevirrasta ja sulkee kaistoja häiriötilanteissa ja tietöiden aikana. Kehätiellä on toiminut ramppiohjausjärjestelmä vuodesta 1989 alkaen. Ramppiohjauksen on todettu vähentävän ruuhkaa ja kehätien nopeudet ovat nousseet. Tielle on asennettu myös reitti-informaatiojärjestelmä, joka kertoo ruuhkasta. (Buijn ym. 1994.)

Toinen keskieurooppalainen esimerkki on saksalainen vaihtuville nopeusrajoituksille ja kaistaohjaukselle tehty liikenteenohjausstrategia, joka perustuu toiminnalliseen palvelutasoon. Strategia perustuu liikennevirtamalliin, joka mahdollistaa dynaamisen liikennetilanteen luokittelun ja antaa sopivan kriteerin aikaiselle varoitukselle ruuhkautumisesta. Varoitusstrategian pohjalta on johdettu ohjauslogiikka, jonka Baijerin pohjoinen liikenteenohjausalue on ottanut käyttöönsä. (Kühne 1991a, 1991b.)

Kolmas keskieurooppalainen esimerkki oli Perugian moottoritie Italiassa. Liikenneturvallisuuden parantamiseksi tielle on asennettu automatisoitu liikenteenohjausjärjestelmä, jonka tehtävänä on monitoroida ja ohjata liikennettä. Järjestelmän tarkoituksena on keskittyä selviytymään hätätapauksista mahdollisimman nopeasti. (Filippi ym. 1989.)

Ensimmäinen yhdysvaltalainen esimerkki on Washingtonin osavaltioon suunniteltu liikenneinformaatiojärjestelmä. Osavaltion alueella on käynnissä useita erilaisia telematiikkahankkeita. Osavaltion informaatiojärjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa näiden järjestelmien keräämien datojen yhteiskäyttöisyys. (Dailey ym. 1993.)

Toisena yhdysvaltalaisena esimerkkinä on maan neljänneksi suurin kaupunki Houston, jossa on aloitettu uusi automaattiseen ajoneuvojen tunnistamiseen (AVI) perustuva liikenteenhallintaohjelma. Liikennetietojärjestelmän avulla liikennekeskus arvioi viivytyksiä, määrittelee niiden syyt ja välittää tiedot tienkäyttäjille muuttuvien opasteiden ja paikallisradion liikennereporttien avulla. Järjestelmän ansiosta työmatka-ajat ovat lyhentyneet ja ruuhkat vähentyneet. (Larue 1995.)

Japanin tielaitos tarjoaa nykyään tienkäyttäjille tie- ja liikenneinformaatiota. Liikennetiedon tarkoituksena on auttaa kuljettajia sekä kiinnittää heidän huomionsa liikenteen rajoituksiin. Tavoitteena on sujuva ja turvallinen liikenne. (Maeda 1991.)

Tokion alueelle on asennettu liikenteenohjausjärjestelmän osaksi liikenneinformaatiota tarjoava järjestelmä. Järjestelmä laskee muun muassa ruuhkan pituuden ja määrittelee matka-aikoja. Järjestelmä kerää myös muuta tietoa liikenteestä sekä tietoja pysäköintiolosuhteista. Liikennetietoa annetaan liikenneinformaa-

tiotauluissa ja –terminaaleissa sekä radion, puhelimen ja faksin välityksellä. (Nakagawa ym. 1995.)

Yokohaman alueella on liikennetietojärjestelmä, joka kattaa 240 km kansallisia pääteitä. Liikennetietojärjestelmä kerää ja analysoi dataa tie-, liikenne- ja sääolosuhteista voidakseen tarjota tienkäyttäjille tarvittavat liikennetiedot. Dynaaminen liikenneinformaatiojärjestelmä tarjoaa ajankohtaista tietoa tietöistä ja liikenteen häiriöistä. Järjestelmä tiivistää liikenneinformaation digitaaliselle kartalle. (Mori-moto ym. 1995.)

Myös Tomein moottoritielle on asennettu nykyaikainen viimeisintä tietotekniikkaa ja kuituoptiikkaa hyväksikäyttävä liikennetietojärjestelmä. Järjestelmä koostuu useasta osajärjestelmästä: liikennemäärien monitoroinnista, kaukomonitoroinnista ja –ohjauksesta, muuttuvista opasteista, liikenne-radiojärjestelmästä, liikennetietotermiinaaleista sekä lepoalueiden ruuhkatietojärjestelmästä. (Maeda 1991.)

Metropolitan-moottoritiellä on seuraavanlaisia ongelmia: kroonisesti lisääntyvä ruuhka, käyttäjien lisääntyvä tarve saada tarkempaa informaatiota ja lisääntyvät kriittiset liikenneonnettomuudet. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi tielle on asennettu radiomajakoita, valomajakoita ja monikaistaisia FM-lähetyksiä hyväksi käytävä järjestelmä. Järjestelmä on ollut vakituksessa käytössä marraskuusta 1995 lähtien. (Honda & Yoneyama 1995.)

Taiwanissa on kasvavan liikenteen ja pahenevien ruuhkien takia ryhdytty kehittämään uusia liikenteenhallintastrategioita. Moottoriteille ollaan suunnittelemassa kehittyntä digitaaliseen kommunikaatioon ja tekoälyyn perustuvaa seuranta- ja ohjausjärjestelmää. Älyjärjestelmä on suunniteltu parantamaan reaaliaikaisia liikenteenohjausoperaatioita kriittisten liikenteenhäiriöiden yhteydessä. (Chang ym. 1995.)

7.6 Liikenteenohjauksen ja liikenneinformaation vaikutukset liikennevirtaan

7.6.1 Muuttuvat nopeusrajoitukset

Valtatiellä 1 tehdyn tutkimuksen (Viatek 1997) tuloksena saatiin, että nopeusrajoituksella 80 km/h ajoneuvojen keskimääräinen matkanopeus oli 86 km/h ja nopeusrajoituksella 100 km/h 96 km/h. Nopeusrajoituksen vaihtaminen muutti pistenopeuksia 5 km/h. Tiellä oli suuria nopeuden muutoksia merkitsevästi enemmän nopeusrajoituksella 100 km/h kuin 80 km/h rajoituksella ja pienillä liikennemäärillä enemmän kuin suurilla.

Valtatiellä 5 saatiin Kallansiltojen kohdalla tulokseksi (Savo-Karjalan tiepiiri 1995), että ajonopeudet olivat sulkukohdassa nopeusrajoituksen ollessa 60 km/h 30 - 50 km/h (keskinopeus 30 km/h) ja nopeusrajoituksella 30 km/h 15 - 25 km/h (keskinopeus 20 km/h). Kun nopeusrajoitus alennettiin muuttuvalla merkillä 100 km/h:stä 80 km/h:iin ja näytettiin samalla "avattava silta" -merkkiä, nopeudet lasivat noin 9 - 11 km/h mittauspisteessä, joka sijaitsi noin 2,5 km ennen siltoja.

Sääohjauksisella tiellä on saatu tulokseksi (Rämä 1997), että kiinteä talvirajoitus 80 km/h alensi kaksikaistaisilla teillä koko liikenteen keskinopeutta 3,8 km/h verrattuna nopeusrajoitukseen 100 km/h ja moottoriteillä rajoituksen alentaminen 120 km/h:stä 100 km/h:iin alensi keskinopeutta 3,9 km/h. Muuttuvat nopeusrajoitukset alensivat talvikaudella koko liikenteen keskinopeutta kelin aiheuttaman aleneman lisäksi 2,5 km/h. Kesäkaudella nopeusrajoituksen alentamisen vaikutuksesta koko liikenteen keskinopeus aleni 5 - 6 km/h. Kun talvikauden aineistosta rajattiin pois hankalimmat kelit, nopeusrajoituksen muuttaminen 100 km/h:stä 80 km/h:iin alensi koko liikenteen nopeuksia 2 km/h enemmän kuin koko aineistossa eli 4,6 km/h. Muuttuvat nopeusrajoitukset pienensivät nopeuksien hajontaa.

Valtatiellä 9 välillä Vaajakoski - Lievestuore - Kuopion läänin raja liikenteen keskinopeus nousi valoisaan aikana 5,1 km/h edellisen päivän nopeuksiin verrattuna, kun nopeusrajoitus nostettiin 80 km/h:stä arvoon 100 km/h (Keski-Suomen tiepiiri 1995).

Rannan & Kallbergin (1996) tekemän kirjallisuusselvityksen mukaan 80 km/h ja 100 km/h nopeusrajoitusalueilla keskinopeuksien ero on 10 km/h. Erilaisia tutkimuksia yhdistelemällä on saatu selville, että nopeusrajoituksen korottaminen lisää aina keskinopeutta ja laskeminen pienentää sitä. Pistejoukkoon sovitettun origon kautta kulkevan suoran mukaan 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen keskimäärin 3,1 km/h ($\pm 0,6$ km/h) sekä rajoitusta korotettaessa että alennettaessa. Finch ym. (1994) puolestaan päätyi vastaavanlaisessa tarkastelussa esittämään, että 10 km/h rajoitusmuutos vaikuttaa keskinopeuteen 2,4 km/h.

Ulkomaalaisena esimerkkinä oli joukko hollantilaisia tutkimuksia. Smulders (1990) on saanut tulokseksi moottoritieltä Rotterdamin läheltä, että liikenteen epävakaas väheni yhtenäistävän ohjauksen seurauksena. Ohjauksen aikana välilysky ei laskenut. Muissa liikennettä kuvaavissa parametreissa, kuten keskinopeudessa, nopeuseroissa tai kaistajakaumissa, ei havaittu merkitseviä muutoksia. Utrechtin lähellä pienien aikavälien osuus laski ja varianssi pieneni ohjauksen vaikutuksesta vasemmalla kaistalla. Oikealla kaistalla keskimääräinen aikaväli pieneni merkitsevästi. Keskinopeus laski hieman molemmilla kaistoilla.

Van den Hoogen & Smulders (1994) selvittivät kuljettajien suhtautumista vaihtuviin nopeusrajoituksiin haastattelututkimuksen avulla. Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että suuri osa kuljettajista kertoi sopeuttavansa nopeutensa nopeusrajoituksen takia ja hyötäneensä järjestelmästä. Nopeusrajoitusten vaikutuksista tehty analyysi osoittaa, että nopeudet alenivat ja nopeuden vaihtelut pienenevät ohjauksen johdosta kaikilla kaistoilla. Shokkiaaltojen määrä ja vakavuus laskivat. Myös aikavälien vaihtelu pieneni. Ohjauksen aikana keskinopeus laski ja keskimääräinen varausaste kasvoi.

7.6.2 Muuttuvat kelivaroitusmerkit

Ensimmäisenä koetalvena liukkaasta varoittavan muuttuvan liikennemerkkin todettiin alentavan Turun tiepiirissä ajonopeutta noin 2 - 4 km/h. Vaikutukset hävisivät 440 - 1 100 metrin päässä merkistä (Rämä ym. 1995). Toisena koetalvena

merkki vähensi kiinteästi valaistuna liikenteen keskinopeutta merkin jälkeen noin 1 km/h ja vilkkuvana noin 2 km/h. Vaikutukset olivat yleensä hieman suurempia vapaiden ajoneuvojen osalta sekä pimeällä. Merkki ei yleensä vaikuttanut aikaväleihin ja sen vaikutuksen nopeuksiin arvioitiin kestävän noin 3 kilometrin päähän. Vilkkuvana viesti näytti vaikuttavan kuljettajien käyttäytymiseen pidempään. (Rämä ym. 1996.)

Kun sääohjauksisella tiellä käytettiin talvella nopeusrajoituksen lisäksi liukkaasta varoittavaa merkkiä, keskinopeudet alenivat merkkijhdistelmän vaikutuksesta vähemmän kuin pelkän alennetun rajoituksen vaikutuksesta. Nopeusprofiileista nähdään, että "liukas ajorata" -merkkiä käytettäessä kelin ja merkkien yhteisvaikutus nopeuteen oli 15 km/h luokkaa. (Rämä 1997.)

7.6.3 Muuttuvat turvaväliopasteet

Ensimmäisen talven tutkimuksissa Turun tiepiirissä (Rämä ym. 1995) saatiin tulokseksi, että turvaväliopaste vähensi alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonoissa. Pitävällä kelillä vähenemä arvioitiin 28 - 48 prosentiksi ja liukkaalla kelillä 37 - 47 prosentiksi. Toisen talven tutkimuksissa (Rämä ym. 1996) opaste vähensi keskinopeuksia merkin jälkeen noin 1 km/h pitävällä kelillä. Turvaväliopaste vähensi alle 1,5 sekunnin aikavälien osuutta jonoissa noin 40 prosenttia. Turvaväliopaste vaikutti noin 8 km matkan ajan. Kun merkkiin liitettiin lisäkilpi "suositus", sen vaikutus aikaväleihin väheni lähes 10 prosenttiyksikköä.

Sääohjauksisella tiellä tehdyn tutkimuksen mukaan kehoitus "muista turvaväli" ei vähentänyt alle 1,5 sekunnin etäisyydellä ajavien osuutta jonossa. (Rämä 1997.)

7.6.4 Ruuhkasta kertovat muuttuvat opasteet

Juhannusliikenteessä valtatieltä 4 vaihtoehtoiselle reitille vaihtavien ajoneuvojen osuus kasvoi reittiopastusjärjestelmän käytön myötä vähintään 5 - 8 prosenttiyksikköä. Elokuisen viikonloppuruuhkan aikana poistumisprosentin laskettiin olleen 5 - 20 prosenttiyksikköä suurempi. Reittiopastuksen päällä olon vaikutus näytti jatkuvan joissain tilanteissa vielä pitkään, vaikka ohjaus oli jo kytketty pois päältä. Syyskuisen perjantain aikana poistumisprosentti oli 0 - 8 prosenttiyksikköä suurempi reittiopastuksen ollessa päällä. Haastattelututkimuksessa noin neljännes vaihtoehtoista reittiä ajavista ilmoitti reittivalintansa syyksi opastuksen. Reittiopastus aiheutti jonkin verran ei-toivottua ajokäyttäytymistä. (Alppivuori ym. 1995.)

Drive II:een kuuluvassa HOPES-projektissa (Kulmala ym. 1995) kävi ilmi, että suurta osaa onnettomuuksista voidaan onnettomuustyyppin ja onnettomuuden syyn perusteella pitää sellaisina, että ne olisi mahdollisesti voitu välttää varoittamalla kuljettajaa liikenteen häiriöistä. Tutkimuksessa selvittiin myös muuttuvien opasteiden viestityypin vaikutusta. Saadut tulokset eivät tukeneet oletusta, että mitä yksinkertaisempi viesti sitä suurempi vaihtelu kuljettajien käyttäytymisessä verrattuna yksilöidympään viestiin. Kaikentyyppisillä varoituksilla oli positiivinen vaikutus kuljettajien käyttäytymiseen.

Hollantilaisessa simulointiin perustuvassa tutkimuksessa (Janssen & van der Horst 1993) selvitettiin, kuinka erilaiset muuttuvissa opasteissa esitetyt ruuhkaa koskevat viestit vaikuttavat kuljettajien reitinvalintaan. Saadut tulokset osoittavat, että informaation antotavalla ja tiedon luotettavuudella on vaikutusta siihen, poikkeako kuljettaja tavalliselta reitiltä vai ei. Mitä huonommalta liikennetilanne vaikuttaa, sitä useammin kuljettaja valitsee vaihtoehdoisen reitin.

Kraan ym. (1998) ovat tehneet yhteenvedon tutkimuksista, jotka ovat selvittäneet Amsterdamin alueen muuttuvien opasteiden vaikutuksia liikenteeseen. Kuljettajat pitivät muuttuvia opasteita erittäin hyödyllisinä ja opasteita selkeinä ja helposti ymmärrettävinä. Järjestelmän käyttäjät olivat sitä mieltä, että järjestelmä on helpokäyttöinen, mutta että se on herkkä sähköisille häiriöille. Poliisien mukaan järjestelmän vaikutukset ovat liikenteenhäiriön sattuessa huomattavat ja opasteiden antama informaatio luotettavaa. Järjestelmän vaikutuksesta liikenneverkon käyttöaste on parantunut. Muutokset viivytyksissä tai reitinvalinnassa eivät ole suuria, mutta erot ovat kuitenkin merkitseviä. Mitä pidemmästä jonosta opaste kertoi, sitä pienempi osa autoilijoista valitsi ruuhkaisemman reitin.

SIRIUS on suurin kaupunkialueella tehty kehittyneiden liikennetietojärjestelmien ja automaattisen liikenteenhallinnan kenttäkoe Euroopassa. Yim ja Ygnace (1996) tutkivat sen avulla muuttuvien opasteiden vaikutusta yksittäisten linkkien liikennemääriin. Tutkimukset osoittivat, että ruuhkasta kertova opaste laski liikennemäärää 3,68 prosenttia. Moottoritien liittymisrampin liikennemäärän laskun voimakkuus on muuttuvan opasteen kertoman moottoritien ruuhkan funktio. Muuttuvat opasteet vaikuttivat kuljettajiin tehokkaimmin silloin, kun ruuhka oli kasvamassa. Opasteiden vaikutus kuljettajiin oli aamuruuhkan aikana voimakkaampi kuin iltaruuhkan aikana.

Wardman ym. (1997) halusivat laajentaa SP-tutkimuksen avulla jo tehtyjä tutkimuksia muuttuvien opasteiden vaikutuksista. Tulokset osoittavat, että kuljettajat valitsevat herkimmin vaihtoehdoisen reitin, kun viivytyksen syynä on onnettomuus. Se, ettei syytä kerrottu lainkaan, oli vaihtoehtoista tehottomin. Tapauksissa, että viivytyksen syynä oli ruuhka tai tietyö, opasteen vaikutus oli hyvin samankaltainen. Kuljettajat arvioivat näkyvien jonojen vaikutuksen viivytykseen yllättävän pieneksi.

Yang ym. (1993) selvittivät kuljettajien reitinvalintakäyttäytymistä tietokonesimulaation avulla. Tulosten mukaan suurin osa kuljettajista perusti reitinvalintapäätöksensä viimeisimpiin kokemuksiinsa ja että henkilökohtaisilla ominaisuuksilla oli suuri vaikutus. Ajokokemuksella vaikutti olevan suurempi vaikutus moottoritien kuin sivutien valintaan.

8 Päätelmiä

8.1 Linkkikohtaisten parametrien estimointi

Vain harva ilmaisintyyppi kykenee siis tuottamaan kaikki automaattisten liikenteenohjaus- tai liikenneinformaatiojärjestelmien tarvitsemat tiedot liikenteestä. Parhaiten tehtävän täyttävät induktioilmaisimet, magnetometri ja kehittynyt videoilmaisimet. Nämä tuottavat kuitenkin, kehittyneitä videoilmaisimia lukuun ottamatta, ainoastaan pistekohtaisia tietoja liikenteestä. Norjassa saatujen tutkimusten (Haugen 1996) mukaan esimerkiksi matkanopeus sopii kuitenkin paremmin liikenteenohjauksen tarpeisiin kuin pistenopeus. **Olisi siis tarpeen kehittää yksinkertaisia menetelmiä linkkikohtaisten parametrien automaattiseen estimointiin.**

Anturiaajoneuvojärjestelmiä on hyvin monenlaisia ja monen tasoisia. Tekniikoita, viestien lähettämisprosessia, viestien sisältöä jne. on mahdollista muokata tarpeiden mukaan. Monen päätiesovelluksen tarpeisiin riittää varmasti usein suhteellisen yksinkertainen järjestelmä, mutta kaupunkisovelluksissa tilanne on toinen. Niin pitkään, kun matkapuhelimien paikantaminen on kiellettyä eikä käytössä ole tietullijärjestelmää tai vastaavaa, johon liittyisi sähköisiä tunnistajia, varsinainen anturiaajoneuvojärjestelmä vaikuttaa Suomen oloihin turhan järeältä vaihtoehdolta.

Jos anturiaajoneuvojärjestelmän pystyttäminen ei kannata, täytyy turvautua muihin linkkiparametrien määrittämismenetelmiin. Kehä I:llä kokeillaan parhaillaan matka-aikojen määrittämistä tunnistamalla rekisteritunnukset automaattisesti videoilmaisimien avulla. Toinen mielenkiintoinen vaihtoehto, jota Suomessa ei ole vielä kokeiltu, on ajoneuvojen tunnistaminen fyysisten ominaisuuksiensa perusteella.

Moniin kohteisiin edellä mainitut menetelmät ovat liian kalliita, joten on syytä selvittää myös edullisempia, induktioilmaisimiin perustuvia vaihtoehtoja. Kahden mittauspisteen menetelmät ovat erittäin yksinkertaisia ja sopivat hyvin teille, joilla on vähän liittymiä ym. nopeuden muutoksia aiheuttavia tekijöitä. Muut menetelmät perustuvat korrelaatioon ja ne vaativat tehokkaan korrelaationhakualgoritmin, jotta menetelmiä voisi käyttää reaaliaikaisissa sovelluksissa. Menetelmät toimivat ainoastaan suhteellisen lyhyillä ja liikenteeltään tasaisilla tiejaksoilla.

Alla on muutamia mahdollisia tutkimushypoteeseja.

- Anturiaajoneuvojärjestelmän rakentaminen ei tällä hetkellä kannata Suomen oloissa.
- Rekisteritunnusten automaattiseen tunnistamiseen perustuva menetelmä sopii vilkasliikenteisille teille, joilla tarvitaan tarkkoja estimaatteja matka-ajoista ja joilla suuri osa liikenteestä ajaa useamman mittauspisteen ohi.
- Muille teille riittää kahden mittauspisteen menetelmällä induktioilmaisimista saatun datan avulla määritetyt matka-aikaennusteet, kunhan ilmaisimia on riittävän tiheästi (vähintään kilometrin välein).

8.2 Liikenne-ennusteiden tekeminen

Dynaamiset liikenneinformaatio- ja liikenteenohjausjärjestelmät eivät voi toimia reaktiivisesti, vaan niiden täytyy osata ennakoida liikennetilanteet ja sopeuttaa strategiansa ajoissa. Myös nykytilanne on ennuste. Yksikään Suomessa käytössä olevista järjestelmistä ei vielä tee ennusteita liikennetilanteen kehityksestä. Erityisesti ruuhkaan perustuvassa ohjauksessa tämä olisi kuitenkin tärkeää ja tästä syystä **olisikin tarpeen selvittää yksinkertaisia ennustamismenetelmiä.**

Olemassa olevat ennustamismenetelmät on rakennettu pääosin matka-aikojen ja liikennemäärän ennustamiseen. Nämä parametrit, kuten myös liikennetiheysennuste, sopivat hyvin ruuhkavaroitus- ja liikenteenohjausjärjestelmien tarpeisiin. Dynaaminen reittiopastusjärjestelmä taas voi hyödyntää lähtöpaikka-määräpaikkamatriisiennustetta.

Vaikka ainakin Hobeika & Ozbay (1991) ovat kehittäneet oman mallinsa nimenomaan reittiohjausjärjestelmien tarpeisiin, ennusteiden tekeminen sijoittelun ja simuloinnin avulla tuntuu työläältä ja hitaalta eikä näin sovi reaaliaikaisiin sovelluksiin, joissa ennusteen pitäisi syntyä nopeasti ja ilman välikäsiä.

Esitellyistä ennustemenetelmistä lähin naapuri –menetelmä kiinnostaa yksinkertaisuutensa ja hyvien tulostensa takia. Lupaavilta vaikuttavat myös neuroverkkoihin ja Kalman-suodattimeen perustuvat menetelmät. ARIMA-malli lienee todistettu tähän tarkoitukseen sopimattomaksi niin monessa tutkimuksessa, että sen voi jättää pois jatkoselvityksistä. Ennusteissa kannattanee keskittyä nopeuden, liikennemäärän ja varausasteen ennustamiseen.

Jos liikenteenohjaus- ja informaatiojärjestelmissä yritetään ennakoida tilanteet reaktiivisen toiminnan sijaan, häiriötkin tulisi havaita ennen kuin niiden vaikutukset ovat mitattavissa nopeuden laskuna tai varausasteen kasvuna, mikä on perinteisten menetelmien ongelma. Uusimmat, eli videokuvaan, neuroverkkoihin ja sumeaaan logiikkaan perustuvat häiriöiden havaitsemismenetelmät, vaikuttavat sopivimmilta automaattisten liikenteenohjaus- ja informaatiojärjestelmien tarpeisiin.

Alla on muutamia mahdollisia tutkimushypoteeseja.

- Ennustamistekniikoista sijoitteluun ja simulointiin perustuvat menetelmät sekä ARIMA-mallit eivät sovellu dynaamisten liikenteenohjaus- tai liikenneinformaatiojärjestelmien tarpeisiin.
- Ei-parametrinen lähin naapuri -menetelmä sopii kohteisiin, joissa liikennetilanne voidaan kuvata yhdellä muuttujalla (esim. liikennemäärällä, varausasteella tai keskinopeudella), jonka perusteella lähimmät naapurit valitaan.
- Jos muuttujia tarvitaan enemmän (esim. liikennemäärä ja keskinopeus yhdestä tai useammasta mittauspisteestä), tietokannassa olevien havaintojen luokitteluun ja lähimpien naapureiden löytämiseen kannattaa käyttää SOM-neuroverkkoa (SOM = itse organisoituva kartta).
- Lähin naapuri –menetelmän hyvien tulosten perusteella voisi olettaa, että SOM-verkko osoittautuu liikenteen ennustamisessa paremmaksi kuin vastaavista algoritmeista perustuva neuroverkko tai Kalman-suodattimeen perustuva malli.
- Neuroverkot pitää opettaa käyttökohteestaan kerätyn datan avulla.

8.3 Virheiden havaitseminen ja niiden vaikutukset

Parametrien määrittämisen ja ennusteiden tekemisen sekä järjestelmän toiminnan kannalta yleensäkin on oletuksena, että järjestelmän saamat syötetiedot ovat oikeita ja että ilmaisimet toimivat moitteettomasti. Ei ole kuitenkaan harvinaista, että ilmaisimien mittaus syystä tai toisesta parametrejä virheellisesti tai menee epäkuntoon. Koska käyttäjien luottamus järjestelmän toimintaan on olennaista, järjestelmä ei saisi toimia "väärin" tällaisissakaan tilanteissa. **Olisikin tarpeen selvittää, kuinka virheilmaisut vaikuttavat järjestelmän toimintaan ja kuinka järjestelmä voi toimia vajaan informaation perusteella.**

Alla on muutamia mahdollisia tutkimushypoteeseja.

- Jos järjestelmän ohjaus perustuu ilmaisimista saatujen liikennettä kuvaavien parametrien raja-arvoihin (esim. nopeuden laskiessa arvoon X km/h, nopeusrajoitus lasketaan arvoon Y km/h), järjestelmää ei voida vajaan datalla käyttää niiltä osin kuin dataa puuttuu.
- Jos data on virheellistä ja ohjaus ei tästä syystä ole tilanteelle optimaalista, liikenteen häiriöiden määrä kasvaa.
- Vajaa data ei juurikaan vaikuta neuroverkkosovellusten (esim. liikennetilanteen ennustamisalgoritmi) toimintaan.

8.4 Järjestelmän rakenteen ja toiminnan välinen yhteys

Erilaiset muuttuvat opasteet ja nopeusrajoitukset olivat hyvin yleisiä esitellyissä automaattisissa liikenneinformaatio- ja ohjausjärjestelmissä. Moni järjestelmä välitti liikennetietoja myös radion välityksellä. Induktioilmaisimien oli ylivoimaisesti yleisin ilmaisintyyppi. Automaattista ajoneuvojen tunnistamista joko tunnisteiden tai fyysisten ominaisuuksien perusteella käytettiin paljon. Monessa järjestelmässä oli lisäksi kamera, jonka avulla liikennetilanne voitiin vahvistaa liikennekeskuksesta käsin. Keli- ja sääolosuhteiltaan vaikeissa paikoissa ilmaisimena käytettiin tiesääasemaa ja tällöin kelitiedot olivat myös päätöskriteereinä. Muuten päätöskriteerit perustuivat yleisimmin liikennemäärään ja pistenopeuteen. Anturiajoneuvosovelluksissa kriteerinä käytettiin myös matkanopeutta, viivytyksiä tai matka-aikaa.

Tarvittavat opasteet ja ohjauskeinot perustuvat yleensä kohteena olevaan tiehen tai tieverkkoon ja sen ongelmiin. Ilmaisintyyppi riippuu tietenkin myös kohteesta, mutta pääkriteerinä sen valintaan pitäisi olla valittu ohjaus- tai informaatiojärjestelmä ja sen tarpeet. Ilmaisimia tulisi olla riittävästi, mutta niiden sijainnit pitäisi valita siten, että selvittää kustannussyistä mahdollisimman pienellä ilmaisimäärällä. Usein järjestelmiä kuitenkin tunnutaan rakennettavan "satunnaisesti" ilman, että ilmaisimien tyyppi, määrä tai sijainti, päätöskriteereissä käytetyt parametrit tai itse päätöskriteerit ovat kunnolla perusteltuja. **Järjestelmän rakenteen ja toiminnan välinen yhteys onkin asia, jota kannattaisi tutkia, jotta järjestelmä saataisiin toimimaan optimaalisella tavalla.**

Alla on muutamia mahdollisia tutkimushypoteeseja.

- Matkanopeus on pistenopeutta parempi liikennetilanteen kuvaaja.

- Jos halutaan estimoida linkkiparametrejä (kuten matkanopeuksia tai -aikoja) induktioilmaisimien avulla, ilmaisimia täytyy asentaa vähintään kilometrin välein.
- Induktioilmaisimien yhdessä kameran kanssa kykenee tuottamaan suuren osan tarvittavasta liikenneinformaatiosta.

8.5 Järjestelmien vaikutukset liikennevirtaan

Selvityksessä esiteltyjen suomalaisten tutkimustulosten perusteella voidaan esittää yhteenveto erilaisten tekijöiden vaikutuksista liikennevirtaan (taulukko 16). Ulkomaiset tulokset ovat olleet samansuuntaisia.

Taulukko 16. Erilaisten tekijöiden vaikutuksia liikennevirtaan.

Rajoitus 100 km/h vs. 80 km/h	<ul style="list-style-type: none"> • Nopeus noin 5 km/h korkeampi • Enemmän suuria nopeuden muutoksia • Nopeuksien hajonta suurempi
Suuri vs. pieni liikennemäärä	<ul style="list-style-type: none"> • Vähemmän suuria nopeuden muutoksia
Huono vs. hyvä keli	<ul style="list-style-type: none"> • Keskinopeus alhaisempi • Nopeusrajoituksen vaikutus pienempi (2 km/h) • Nopeuksien hajonta suurempi
Liukas ajorata –merkki vs. ei merkkiä	<ul style="list-style-type: none"> • Nopeudet alhaisempia (noin 2 km/h) • Vilkkuvana alentaa enemmän nopeuksia ja vaikutus kestää pidempään kuin kiinteästi valaistuna
Muuttuva turvaväli -opaste vs. ei opastetta	<ul style="list-style-type: none"> • Pienien aikavälien osuus saattaa olla pienempi • Keskinopeus alhaisempi (1 km/h)

Kelin ja sään vaikutuksen osuutta havaituista muutoksista liikennevirrassa on selvitetty mm. sääohjauksisella tiellä (Rämä 1997). Muutoksia on kuitenkin tutkittu erittäin vähän liikennetilanteen (esim. liikennemäärän tai varausasteen) funktiona. Tähän on syynä monen kohteen ”pienet” liikennemäärät, jolloin varsinaisia liikenneolosuhteista johtuvia riippuvaisuuksia on hankala selvittää. Sekä ulkoisten että näiden liikenteestä johtuvien olosuhteiden vaikutukset eri parametrien käyttäytymiseen ovat kuitenkin tärkeitä, kun järjestelmille suunnitellaan ohjausstrategioita. **Tuloksia olisikin tarpeen täydentää liikenneolosuhteiden vaikutusten osalta.**

Alla on muutamia mahdollisia tutkimushypoteeseja.

- Nopeusrajoituksen alentaminen alentaa liikennevirran keskinopeutta kaikilla liikennemäärillä.
- Nopeusrajoituksen alentaminen pienentää nopeuksien hajontaa kaikilla liikennemäärillä.
- Muuttuvat nopeusrajoitukset tasoittavat liikennevirtaa kaikilla liikennemäärillä.
- Ohjauksen liikennevirtaa tasoittava vaikutus kuitenkin vähenee liikennemäärän kasvaessa, koska suuri liikennemäärä jo itsessään tasoittaa virtaa.

Lähdeluettelo

AIKAWA K, KANEKO Y, MATANO M (1998). *Introduction of Intelligent Vehicle Detection Sensors*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October 1998, Seoul, Korea. 7 s.

ALPPIVUORI K, ANILA M, PAJUNEN K (1995). *Valtatie 4:n Järvenpää-Mäntsälä-välin muuttuvan reittiopastusjärjestelmän vaikutukset*. Tielaitoksen selvityksiä 86/1995. Tielaitos, Kehittämiskeskus, Helsinki. 55 + 19 s.

ANANTHARAM V (1998). *Estimation of Travel Time Distribution and Detection of Incidents Based on Automatic Vehicle Classification*. Final Report, MOU 223. California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-98-12. 25 s.

ASHOK K, BEN-AKIVA M (1993). *Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management Systems*. 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, California. Transportation and Traffic Theory, Elsevier, Amsterdam, New York. s. 465 - 484.

BELL M (1994). *Traffic Control*. Advanced Technology for Road Transport: IVHS and ATT (Toimittaja: Catling I). Artech House, Inc., Boston, USA. s. 49 - 64.

BEN-AKIVA M, CANTARELLA G, CASCETTA E, RUITER J DE, WHITTAKER J, KROES E (1992). *Real-Time Prediction of Traffic Congestion*. The 3rd International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems, Oslo, Norway. Conference Record of Papers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N. Y. s. 557 - 562.

BUIJN H, COËMET M, SCHOUTEN W (1994). *Dynamic Traffic Management Systems on the Ring Road of Amsterdam*. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 26 - 28 April 1994. Conference Publication No. 391, The Institute of Electrical Engineers, IEE, London, UK. s. 150 - 155.

CASSIDY M, WINDOVER J (1995). *A Method for Assessing the Dynamics of Freeway Traffic Flow*. Transportation research record. No. 1484 (July 1995). s. 73-79.

CHANG E (1992). *A Neural Network Approach to Freeway Incident Detection*. The 3rd International Conference on Vehicle Navigation & Information Systems. Conference Record of Papers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N. Y. s. 641 – 646.

CHANG E, HO K, LIU K, HSU C (1995). *Development of an Integrated Freeway management System*. Intelligent Transportation, Serving the User Through Location, Proceedings of the 1995 Annual Meeting of ITS America. s. 589 - 595.

DAILEY D, HASELKORN M, LIN P (1993). *Traffic Information and Management in a Geographically Distributed Computing Environment*. Pacific Rim TransTech Conference Proceedings, Volume I (Toimittajat: Hendrickson C T, Sinha K). s. 159 - 165.

DALGLEISH M J (1994). *Vehicle Detection for Advanced Transport Telematics*. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 26 -

- 28 April 1994. Conference Publication No. 391, The Institute of Electrical Engineers, IEE, London, UK. s. 164 - 167.
- DIA H, ROSE G (1997). *Development and Evaluation of Neural Network Freeway Incident Detection Models Using Field Data*. Transportation Research, Volume 5 C, Number 5 / 1997. s. 313 - 331.
- DIA H, ROSE G (1998). *The Impact of Data Quantity on the Performance of Neural Network Freeway Incident Detection Models*. Neural Networks in Transport Applications (Toimittajat: Himanen V, Nijkamp P, Reggiani A). Ashgate, Aldershot, England. s. 311 - 340.
- FILIPPI F, GUERRIERO G, CECCONI C, MANTOVANI G (1989). *Traffic Monitoring and Information Technology: the Case of the Perugia Urban Freeway*. Second International Conference on Road Traffic Monitoring, Institution of Electrical Engineers, Savoy Palace, London, 1989. IEE. s. 108 - 112.
- FINCH D, KOMPFFNER P, LOCKWOOD C, MAYCOCK G (1994). *Speed, Speed Limits and Accidents*. Project Report 58, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK. 24 s.
- GIÆVER T (1996). *Traffic Flow and Road User Information on E18 in the County of Vestfold, Norway. Recording of Traffic Data - Information about Delays and Alternative Routes*. SINTEF Civil and Environmental Engineering, Transport Engineering, Norway. 15 s.
- HAUGEN T (1996). *Section Data. Possibilities and experiences*. SINTEF Civil and Environmental Engineering, Transport Engineering, Norway. 16 s.
- HOBEIKA A, OZBAY K (1991). *A Dynamic Traffic Assignment Model in the Context of Real Time Driver Information System*. 24th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, 20 - 24th May 1991. Automotive Automation Limited, Croyden, England. s. 473 - 480.
- HOLMA M (1991). *Kalman-suodatuksen periaatteet ja käyttö liikenneteknisissä mittauksissa ja liikenteen ohjauksessa*. Matematiikan erikoistyö, Teknillinen korkeakoulu. 15 + 3 s.
- HONDA K, YONEYAMA M (1995). *Road Traffic Information Communication System at the Metropolitan Expressway*. Steps Forward, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95 Yokohama, November 9 - 11, Japan. VERTIS - Vehicle Road and Traffic Intelligence Society, Tokyo, Japan. s. 1530 - 1535.
- HOOGEN E VAN DEN, SMULDERS S (1994). *Control by Variable Speed Signs: Results of the Dutch Experiment*. Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 26 - 28 April 1994. Conference Publication No. 391, The Institute of Electrical Engineers, IEE, London, UK. s. 145 - 149.
- HOOSE N (1991). *Computer Image Processing in Traffic Engineering*. Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, UK. 207 s.
- INNAMAA S (1997). *Moottoriteliikenteen mallintaminen - mikroskooppinen simulointi ja liikennevirran peruskuvaajat*. Diplomityö, liikennelaboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 142 s.

JANSSEN W, HORST R VAN DER (1993). *Presenting Descriptive Information in Variable message Signing*. Transportation Research Record, No. 1403. s. 83 - 87.

JOHANSSON M (1996). *Liikenteen seuranta ja häiriöiden havaitseminen*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio. 95 s.

KAAKKOIS-SUOMEN TIEPIIRI (1995). *Weather Controlled Road and Investment Calculations*. 12/95, Kaakkois-Suomen tiepiiri, Tielaitos, Kouvola. 34 s.

KAAKKOIS-SUOMEN TIEPIIRI (1997). *Sääohjattu tie vt7 (E18) Siltakylä – Summa, Muuttuvien opasteiden ohjausperiaatteet, Pyhtää, Kotka, Vehkalahti*. Kaakkois-Suomen tiepiiri, Liikenteen hallinta ja palvelut, Tielaitos, Kouvola. 17 + 5 s.

KARVONEN T, KETTUNEN J, VAKKILAINEN P (1982). *Kalman-suodattimen käyttö hydrologisten ja ekologisten mallien tilan identifioinnissa ja parametriestimoinnissa*. Monistesarja 1982:1, Teknillinen korkeakoulu, Vesitalouden laboratorio, Espoo. 45 s.

KAUSTE E, PILLI-SIHVOLA Y, PORTAANKORVA P (1998). *Valtatien 7 (E18) sääohjauksen jatkaminen välillä Kotka - Pyhtää*. 3/1998, Kaakkois-Suomen tiepiiri, Liikenteen palvelut, Tielaitos, Kouvola. 51 + 7 s.

KESKI-SUOMEN TIEPIIRI (1995). *Muuttuvat nopeusrajoitukset Keski-Suomen tiepiirissä*. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 64/1995. Tielaitos, Keski-Suomen tiepiiri, Tampere. 13 + 8 s.

KRAAN M, ZIJPP N VAN DER, TUTERT B, VONK T, MEGEN D VAN (1998). *Evaluating Network Wide Effects of VMS's in the Netherlands*. Paper submitted for presentation at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 10 - 14 1999, Washington, and for publication in Transportation Research Record. 18 s.

KULMALA R, FRÄNZEN S, DRYSELIUS B (1995). *Safety Evaluation of Incident Warning Systems, Integration of Results*. HOPES, Horizontal Project for the Evaluation of Safety, Drive II Project V2002, Deliverable 35, Workpackage 31, Activity 31.8. 29 + 18 s.

KULMALA R, LUOMA S (1998). *VIKING Monitoring State of the Art 1998*, Version 1.0 October 1998. Euro-Regional Project VIKING. 37 s.

KWON E (1991). *A New Approach for Real-Time Prediction of Traffic Demand-Diversion in Freeway Corridors*. Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering: Proceedings of the Second International Conference, New York, American Society of Civil Engineers. s. 398 - 402.

KWON E, STEPHANEDES Y (1994). *Comparative Evaluation of Adaptive and Neural-Network Exit Demand Prediction for Freeway Control*. Transportation Research Record 1446. s. 66 - 76.

KÜHNE R (1991a). *Freeway Control Using a Dynamic Traffic Flow Model and Vehicle Re-identification Techniques*. Transportation Research Board, 70th Annual Meeting, January 13 - 17, 1991, Washington D.C., Preprint. 30 s.

- KÜHNE R (1991b). *Freeway Control Using a Dynamic Traffic Flow Model and Vehicle Re-identification Techniques*. Transportation Research Record, No. 1320. s. 251 - 259.
- LARSEN R (1996). *CAPITAL - Using Cellular Phones as Traffic Probes*. Traffic Technology International Aug/Sept 1996. s. 46 - 50.
- LARUE P (1995). *Traffic Monitoring and Traveler Information in a Metropolitan Area*. Traffic Technology International 1995. s. 68 - 72.
- LEE S, KIM D, KIM J, CHO B (1998). *Comparison of Models for Predicting Short-Term Travel Speeds*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.
- LEE Y-I, HWANG J-H (1998). *Development of an Incident Detection Algorithm Using Discrete Choice Model*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.
- MAEDA Y (1991). *Unanticipated Events on National Expressways*. Wheel Extended 1991/06. Toyota Motor Corporation, Tokyo, Japan. s. 11 - 19.
- MATSUI H, FUJITA M (1998). *Travel Time Prediction for Freeway Traffic Information by Neural Network Driven Fuzzy Reasoning*. Neural Networks in Transport Applications. (Toimittajat: Himanen V, Nijkamp P, Reggiani A.) s. 355 - 364.
- MORIMOTO T, ADACHI S, KAWABUCHI H (1995). *Yokohama National Highway Information Management System*. Steps Forward, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95 Yokohama, November 9 - 11, 1995. VERTIS - Vehicle, road and traffic intelligence society, Tokyo, Japan. s. 750 - 755.
- MYERS T (1996). *Laser Sensors for Traffic Monitoring and Control*. Traffic Technology International 1996. s. 132 - 138.
- NAKAGAWA S, HORIE H, FUKUMITSU T, FUJIMOTO Y, KUROGO H (1995). *Traffic Information Providing System Using Multi-Media Advanced Traffic Control System of Tokyo Metropolitan Police Department*. Steps Forward, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95 Yokohama, November 9 - 11, 1995. VERTIS - Vehicle, road and traffic intelligence society, Tokyo, Japan. s. 798 - 803.
- PAPAGEORGIOU M (1983). *Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. 186 s.
- PARK C, OH J, KIM S (1998). *Determination of Optimal Number of Probe Vehicles for Real-Time Traffic Flow Information*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October 1998, Seoul, Korea. 8 s.
- PFANNERSTILL E (1991). *Measuring Section-Related Traffic Data by Correlation Methods - a New Approach to Traffic Monitoring and Control*. Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering: Proceedings of the Second International Conference, New York: American Society of Civil Engineers. s. 1 - 5.

PURSULA M (1988). *Detection and Traffic*, Kirjallisuusreferaatti. Tiedote 23, Liikennetekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 63 s.

PURSULA M, LYLY S, ENBERG Å (1988). *Länsiväylän liikennevirtatutkimukset, Yhteenveto*. Julkaisu 64, Liikennetekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 91 s.

PURSULA M, PIKKARAINEN P (1994). *A Neural Network Approach to Vehicle Classification with Double Induction Loops*. Proceedings of 17th ARRB Conference, Part 4. s. 29 - 44.

RAITIO J (1998). *Sään ja kelin tunnistaminen muuttuvien nopeusrajoitusten ohjaamiseksi Kotka-Hamina -moottoritiellä*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Teknillisen fysiikan koulutusohjelma.

RANTA S, KALLBERG V-P (1996). *Ajonopeuden turvallisuusvaikutuksia koskevien tilastollisten tutkimusten analyysi*. Tutkimusraportti 362, VTT, Yhdyskuntateknikka, Liikenne ja kuljetukset, Espoo. 75 + 12 s.

ROLLUS J, BOUZINAB A, CHAVERET M (1998). *Liege - Incident Detection System*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 - 16 October 1998, Seoul, Korea. 8 s.

RÄMÄ P (1997). *Sää- ja kelitietoon perustuvan liikenteen ohjausjärjestelmän vaikutukset Kotka-Hamina-moottoritiellä*. Tielaitoksen selvityksiä 1/1997, Tielaitos, Helsinki. 64 + 23 s.

RÄMÄ P, KULMALA R, HEINONEN M (1995). *Muuttuvien kelivaroitusmerkkien vaikutukset liikennekäyttäytymiseen Turun tiepiirissä talvella 1993 - 1994*. Tielaitoksen selvityksiä 36/1995, Tielaitos, Helsinki. 39 s.

RÄMÄ P, KULMALA R, HEINONEN M (1996). *Muuttuvien kelivaroitusmerkkien vaikutus ajonopeuksiin, aikaväleihin ja kuljettajien käsityksiin*. Tielaitoksen selvityksiä 1/1996, Tielaitos, Helsinki. 54 + 23 s.

SAVO-KARJALAN TIEPIIRI (1995). *Kallansiltojen muuttuvan liikenteenohjauksen vaikutus selvitys*. Tielaitoksen selvityksiä. Tielaitos, Savo-Karjalan tiepiiri, Kuopio. 36 + 21 s.

SHINOZAKI T, KANEKO Y, MATANO M (1998). *Abnormal Incident Detection System Employing Image Processing Technology*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 - 16 October 1998, Seoul, Korea. 8 s.

SMITH B, DEMETSKY M (1994). *Short-Term Traffic Flow Prediction: Neural Network Approach*. Transportation Research Record 1453. s. 98 - 104.

SMITH B, DEMETSKY M (1997). *Traffic Flow Forecasting: Comparison of Modeling Approaches*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, No. 4, July / August 1997. s. 261 - 266.

SMULDERS S (1990). *Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs*. Transportation Research, Volume 24 B, No. 2. Pergamon Press plc, UK. s. 111 - 132.

- SODEIKAT H (1994). *Cooperative Transport Management with EURO-SCOUT*. Advanced Technology for Road Transport: IVHS and ATT (Toimittaja: Catling I). Artech House, Inc., Boston, USA. s. 65 - 78.
- SRINIVASAN K, JOVANIS P (1996). *Determination of Number of Probe Vehicles Required for Reliable Travel Time Measurement in Urban Network*. Transportation Research Record, No. 1537. s. 15 - 22.
- STENBERG U (1999). Urban Stenbergin (konsulttitoimisto Columna, Borlänge, Ruotsi) haastattelu sähköpostin välityksellä 10.2.1999, <http://www.enator.se/telub/>, <http://www.ird.ca/>
- STEPHANEDES Y, ARGIROPOULOS I, MICHALOPOULOS P (1990a). *On-Line Traffic Assignment for Optimal Freeway Corridor Control*. Journal of Transportation Engineering, Volume 116, No. 6. s. 744 - 755.
- STEPHANEDES Y, KWON E, MICHAPOULOS P (1990b). *On-Line Diversion Prediction for Dynamic Control and Vehicle Guidance in Freeway Corridors*. Transportation Research Record, No. 1287. s. 11 - 19.
- STEPHANEDES Y (1991). *Dynamic Diversion Prediction for Real-Time Control in IVHS Networks*. 24th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, 20 - 24th May 1991. Automotive Automation Limited, Croyden, England. s. 459 - 463.
- TAKIZAWA K, AOTANI T, YAMAGUTI M (1995). *Traffic Information Processing System, Advanced Traffic Control System of Tokyo Metropolitan Police Department*. Steps Forward, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems '95 Yokohama, November 9 - 11, Japan. VERTIS - Vehicle Road and Traffic Intelligence Society, Tokyo, Japan. s. 60 - 65.
- UUDENMAAN TIEPIIRI (1999). *Länsiväylän ruuhkavaroitussjärjestelmän arviointi*. Tielaitoksen selvityksiä 30/1998, Uudenmaan tiepiiri, Tielaitos, Helsinki. 42 s.
- VIATEK OY (1997). *LIIVI - Vaihtuvan nopeusrajoituksen vaikutuksesta liikennevirtaan*. Uudenmaan tiepiiri, Tielaitos, Helsinki. 31 s.
- VUORI J, HARJU P, OVASKA S (1996). *Location Tracking in Cellular Networks Using Predictive Position Filters*. MDMC'96, Seoul, Korea, July 1996. 4 s.
- WANG Y, SISIOPIKU V (1998). *Review and Evaluation of Incident Detection Methods*. Konferenssi-cd, 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 - 16 October 1998, Seoul, Korea. 9 s.
- WARDMAN M, BONSALE P, SHIRES J (1997). *Driver Response to Variable Message Sign: a Stated Preference Investigation*. Transportation Research, Part C, Emerging Technologies, Volume 5 C, No. 6, (December 1997). s. 389 - 405.
- WESTERMAN M (1995). *Real-Time Traffic Data Collection for Transportation Telematics*. Delft University of Technology, Delft. 266 + 43 s.
- YANG H, KITAMURA R, JOVANIS P, VAUGHN K, ABDEL-ATY M (1993). *Exploration of Route Choice Behavior with Advanced Traveler Information Using Neural Network Concepts*. Transportation, No. 20. s. 199 - 223.

YIM Y, YGNACE J-L (1996). *Link Flow Evaluation Using Loop Detector Data: Traveler Response to Variable Message Signs*. Transportation Research Record, No. 1550 (Nov. 1996). s. 58 - 64.

YUMOTO N (1990). *Advanced Traffic Information System, "Past, Present and Future"*. 22nd ISATA in Pursuit in Technical Excellence, 1990. s. 151 - 158.

ZHANG H, RITCHIE S, LO Z-P (1997). *Macroscopic Modeling of Freeway Traffic Using an Artificial Neural Network*. Transportation Research Record 1588. s. 110 - 119.

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-557-3
TIEL 3200573